



Etude de la modification de la source dans l'utilisation de la méthode de co-optimisation source masque en lithographie optique : mise en oeuvre et applications

Clovis Alleaume

► To cite this version:

Clovis Alleaume. Etude de la modification de la source dans l'utilisation de la méthode de co-optimisation source masque en lithographie optique : mise en oeuvre et applications. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2014. Français. NNT : 2014STET4007 . tel-01164754

HAL Id: tel-01164754

<https://theses.hal.science/tel-01164754>

Submitted on 17 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LYON-ST ETIENNE

Présentée par:

ALLEAUME Clovis

Thèse dirigée par "**Alexandre Tishchenko**"

et codirigée par "**Emek Yesilada**".

Préparée au sein du **Laboratoire Hubert Curien** St Etienne en partenariat avec **STMicroelectronics** Crolles.

ETUDE DE LA MODIFICATION DE LA SOURCE DANS L'UTILISATION DE LA METHODE DE CO- OPTIMISATION SOURCE MASQUE EN LITHOGRAPHIE OPTIQUE, MISE EN OEUVRE ET APPLICATIONS.



Thèse soutenue publiquement le **23/04/2014** à Saint Etienne, devant le jury composé de :

Mme. Isabelle Schanen

Directrice du CPP : la Prépa des INP – Grenoble

M. Bernard Kress

Professeur

M. Emek Yesilada

RET R&D Manager at STMicroelectronics

M. Vincent Farys

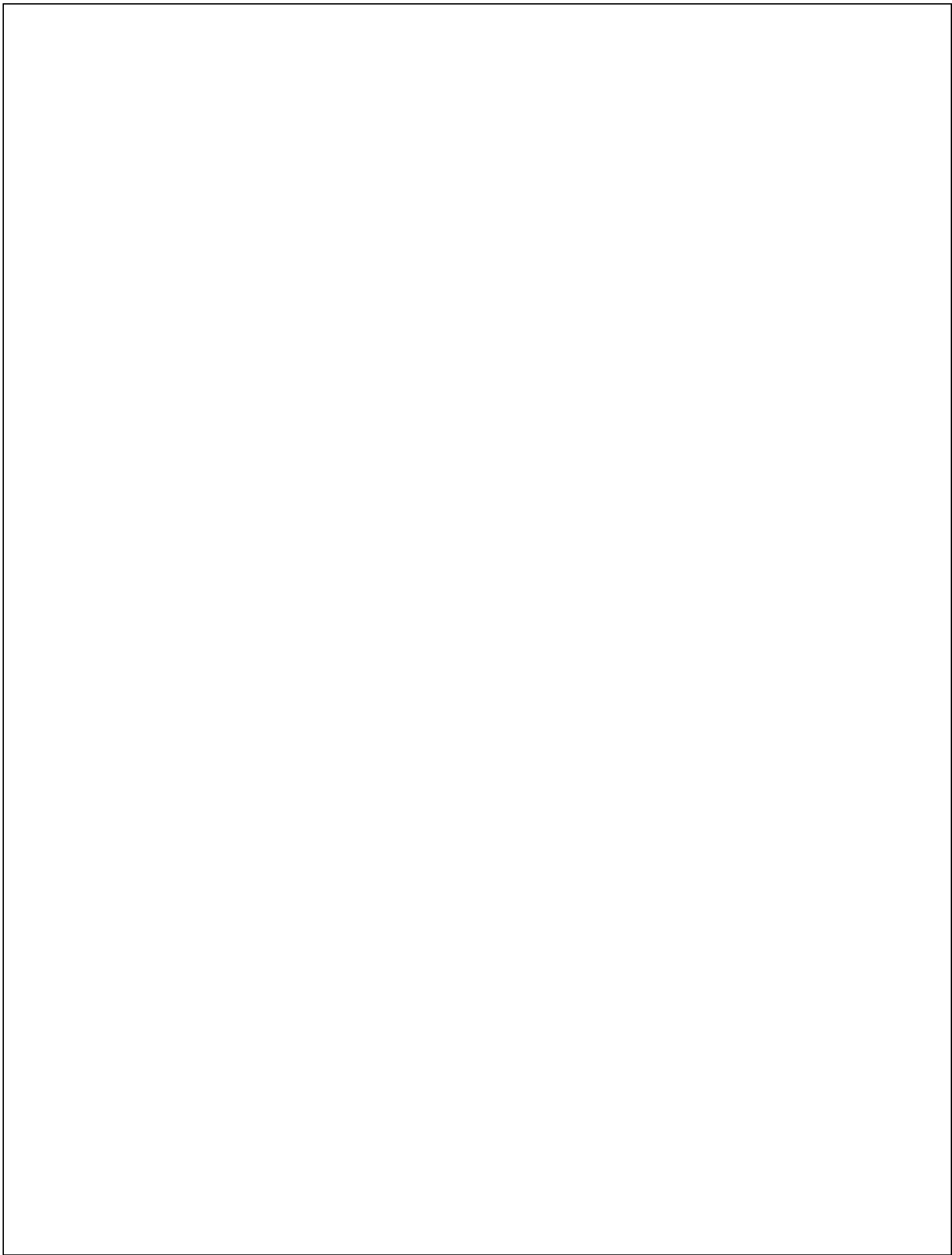
Docteur a STMicroelectronics

M. Olivier Parriaux

Professeur

M.Alexandre Tishchenko

Professeur



Si j'ai vu plus loin, c'est parce que j'étais
assis sur les épaules de géants.
— Isaac Newton

A ma mère.

Remerciement

Au cours de ces trois années de thèse, un énorme travail a été réalisé sur l'étude de la technique d'optimisation des sources lumineuses utilisées en lithographie. Ce travail n'aurait jamais pu être réalisé seul. Je souhaiterais donc remercier toutes les personnes qui ont rendu cette thèse possible.

En premier lieu je tiens à remercier toutes les personnes de STMicroelectronics qui ont su m'accueillir au sein de leur équipe. Je n'aurais jamais autant mangé de gâteau qu'en votre compagnie.

Par-dessus tout je souhaite remercier mon directeur de thèse, Emek Yesilada, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse et m'avoir guidé pendant ces trois ans. Un énorme merci également à Vincent Farys qui a su répondre à mes questions lorsque Emek n'était pas disponible. Merci d'avoir su me former, m'aider et de m'avoir suivis tout au long de cette thèse. Un grand merci à Yorick Trouiller pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe RET, pour m'avoir encouragé et poussé à me donner à fond. Merci également pour tout ce que tu as pu faire pour moi-même après être parti au CEA.

Je tiens également à remercier les personnes de l'équipe RET qui ont pu m'aider durant ma thèse, que ça soit grâce à des formations ou grâce à des collaborations. Je tiens particulièrement à remercier Jean-Christophe Le Demat pour le travail réalisé sur la source métal 28, cela m'a beaucoup aidé, Christian pour les réponses à mes problèmes de lapi, j'espère que tu ne m'en voudras pas d'avoir déjà tout oublié, mais je ne suis pas sûr d'avoir jamais vraiment compris de toute façon, Sébastien pour ta fiche qui m'a sauvé de nombreuses soirées en m'évitant de m'énerver sur le SEM le vendredi à 18h, Jean-Noël pour m'avoir aidé sur de nombreux points, j'espère que tu n'as pas trop espionné mon écran pendant ces trois ans, Alexandre pour la thésard académie, c'était inattendu et agréable de se sentir aidé, Nicolas pour ton inspiration sur de nombreux slides, si ma soutenance est bourrée d'animations c'est de ta faute, Jean Christophe Michel pour m'avoir fait lever à 5h45, franchement quelle idée, Loïc pour toutes les questions bêtes que j'ai pu te poser, ils ont bien fait de nous installer Messenger, Anna pour tes questions sur Flexwave toujours poser avec le sourire, et rien que ça, ça me donnait envie de trouver la bonne réponse, Gurwan pour le travail effectué sur SMO, j'espère que ça marchera un peu plus comme tu veux par la suite, Fred pour tellement de chose, je ne comprend toujours pas comment tu fais pour faire tout ça en si peu d'heures, Jérôme pour le travail rigoureux qui m'a permis de me lancer dans ma thèse, Sylvain et Nassima pour m'avoir tenu compagnie durant

les longues présentations SPIE, Catherine pour l'aide apporté sur les modèles, Charlotte pour ta bonne humeur et tes conseils sur mon avenir, j'essayerai de les prendre en comptes promis, Elodie pour tes conseils sur la photo, oui je sais ça n'a rien à voir avec la thèse, Frank pour mes trop nombreuses questions sur les modèles 28, Jonathan pour les collaborations sur le contrôle de la source ainsi que sur Flexwave, c'était très intéressant et ça changeait de mon quotidien, Guillaume pour avoir su pousser mes outils dans leur retranchement, Jean Luc pour avoir été un tel exemple et Valérie pour avoir été une compagne de bus aussi agréable.

Je tiens également à remercier les personnes extérieurs à l'équipe RET avec qui j'ai eu l'occasion de travailler, à commencer par Franky pour sa bonne humeur et ses mails toujours aussi professionnels, Laurent et toute l'équipe de Brion Technologie pour m'avoir formé et guidé ainsi sur l'outil SMO, toute l'équipe de Mentor Graphics pour les mêmes raisons et notamment Joerg Mellman, Marie Costes pour avoir rendu mon séjour à Monterey moins solitaire ainsi que toutes les personnes que j'ai pu rencontrer lors de mes déplacements.

Je tiens également à remercier les personnes avec qui j'ai pu avoir des interactions extra professionnelles au sein de ST, merci à toute l'équipe de la chorale, Nicolas ainsi que les gens du Jorky, Franky pour le wake et Emek pour les Chardons.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont su m'encourager durant cette thèse, surtout sur la fin. Merci à Etienne pour tous ces après midi passés à travailler ensemble, Benoit pour m'avoir permis de me détendre durant les weekends, Siham pour m'avoir motivé, Aurore pour ta vision toujours optimiste de la thèse, Ariane pour tous tes nombreux conseils. Je tiens également à m'excuser auprès de ceux que j'ai abandonnés pour rédiger ce manuscrit, désolé Flop, Sylvain, Cynthia, Chrys, Nico, Fred, Guillaume, Ness, promis, ce n'est que partie remise.

Finalement, je tiens à remercier ma famille pour tout le soutien apporté, moralement et techniquement durant ces trois ans. Merci à Fanny pour tout ce qu'elle a pu faire pour moi. Merci à mon père pour toutes les relectures et pour les très bons repas durant ces trois ans, ça va me manquer. Et enfin, et surtout, je tiens à remercier ma mère, qui m'a soutenue et aidée tout au long de ces trois ans. Pour toutes les soirées passées ensemble à terminer bien trop tard, pour ta disponibilité et tes conseils, je tenais à te dire un grand merci du fond du cœur.

Résumé

Réalisée entre décembre 2009 et décembre 2012 au sein de STMicroelectronics Crolles dans l'équipe RET (résolution enhancement techniques), et en partenariat avec le laboratoire Hubert Curien Saint Etienne de l'université de Lyon, cette thèse s'intitule "Impact de la modification de la source dans l'utilisation de la méthode de cooptimisation masque source en lithographie optique, et application au nœud technologique 20 nm". Durant cette étude, nous avons pu étudier la technique d'optimisation de la source optique en lithographie, appelée généralement SMO afin de l'appliquer aux problématiques de l'industrie.

Une première partie du manuscrit traitant de la lithographie optique permettra de mieux comprendre les problématiques liées à cette étude, en présentant les techniques utilisées. En effet, afin de permettre à la lithographie optique de continuer la miniaturisation des composants de microélectronique, il est nécessaire d'optimiser au maximum de nombreux éléments de la lithographie. La forme de la source optique utilisée n'échappe pas à cette règle et l'utilisation de sources étendues, hors axe et plus ou moins complexe permet aujourd'hui la production des technologies de pointes.

Une seconde partie s'attardera plus sur l'optimisation de la source à proprement parler. Dans un premier temps, la théorie de la diffraction sera étudiée afin de permettre une meilleure compréhension du problème. Des simulations et des mesures SEM ou microscope électronique à balayage seront présentées pour montrer l'efficacité de la méthode SMO, de l'anglais "Source Mask Optimization". Cette étude donnant lieu au développement de nouvelles méthodes rapides et innovantes d'optimisation de la source, l'étude prendra soin de présenter des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse. Ainsi, la méthode de SMO interne basée sur le phénomène de diffraction et créée durant cette thèse sera présentée dans cette étude et les résultats en découlant seront étudiés.

L'application de l'optimisation de la source à des problématiques industrielles sera également présentée à travers différentes applications des solutions proposées. Finalement, un legs de connaissance nécessaire sera effectué par la présentation des différents outils développés durant cette thèse.

Une troisième partie concernera l'étude de l'outil Flexray permettant la génération des sources optimisées. La thèse ayant donné lieu à une nouvelle technique de décomposition de la source en polynôme de Zernike, cette technique sera présentée ici. Elle sera ensuite utilisée pour modéliser la dégradation d'une source, ainsi que

pour corrélérer la différence de source avec la divergence du modèle empirique de simulation.

L'étude des sources a été mise en place suivant un aspect industrielle, afin de contrôler l'évolution du scanner de façon rapide. De plus, des simulations peuvent être utilisées pour compléter cette étude.

Finalement, une dernière partie traitera de la cooptimisation entre la source et différents éléments tels que le masque et la forme final du motif souhaité. En effet, si la forme initiale du motif souhaité joue un rôle important dans la définition de la source, il est possible de modifier cette dernière, ainsi que la forme du masque en lui appliquant un OPC afin d'obtenir de meilleurs résultats. Ces modifications seront étudiées durant le dernier chapitre.

Abstract

Conducted between December 2009 and December 2012 within the RET (resolution enhancement technology) team at STMicroelectronics Crolles and in partnership with Saint-Etienne laboratory Hubert Curien of the University of Lyon, this thesis entitled "Impact of changing the source while using the source mask optimization technique within optical lithography, and application to 20 nm technology node. ". In this thesis, Alleaume Clovis studied the optimization of the source used in optical lithography, technique usually called SMO (for source mask optimization) and applied the technique to the industry through several problems.

The first part of the manuscript describe the optical lithography generalities, in order to allow a better understanding of the issues and the techniques used in this study. Indeed, to allow optical lithography to continue the miniaturization of microelectronic components, it is necessary to optimize many aspects of the lithography. The shape of the light source used is no exception to this rule and the use of extended sources, off-axis and more or less complex now enables the production of advanced technologies.

The second part will then focus on the source modification and optimization. In a first step, the diffraction theory will be examined to demonstrate the theoretical interest of the thesis, and to allow a better understanding of the problem. Simulations and SEM measurements will be presented to show the effectiveness of SMO method. As this study gave birth to several innovative source optimization techniques, they will be presented. Thus, the method of internal SMO based on the phenomenon of diffraction and created during this thesis will be presented and the results would be studied.

The application of the source optimization to industrial problems will also be presented through different applications. Finally, a legacy of knowledge will be done by presenting the different tools developed during this thesis.

A third part will deal with the study of tool which generate the source inside the scanner allowing the use of optimized and complex sources. The thesis has given rise to a new source decomposition technique using Zernike polynomial. It will be used in this study to model the degradation of a source, and for correlating the impact of a source modification due to SMO technique on the empirical model stability.

The study of sources has been implemented according to industrial aspect to monitor the scanner with a quick method. In addition to the Zernike decomposition method, simulations can be used to complete this study. The forth chapter of this study

will talk about this implementation.

Finally, the last part of the study will talk about the co-optimization of the source with several elements, such as the mask OPC and the final shape of the desired pattern. Indeed, if the initial shape of the desired pattern plays an important role in defining the source, it is possible to modify the latter design shape, as well as the shape of the mask in order to optimize both the source and the target shape. These changes will be discussed in the last chapter.

Table des matières

Remerciement	v
Résumé	vii
Abstract	ix
Introduction	1
1 La lithographie optique	5
1.1 La technologie CMOS	6
1.2 La photolithographie	10
1.2.1 Principes généraux	10
1.2.2 Le scanner	11
1.2.3 Résolution	12
1.2.4 Les types de masques	14
1.2.5 La lithographie par immersion	16
1.2.6 Résine photosensible	16
1.3 Qualité de la lithographie	19
1.3.1 Différentes notions	19
1.3.2 Contraste	20
1.3.3 Variation de dose	21
1.3.4 Défocus et profondeur de champ	22
1.3.5 Courbes de Bossung et Process Window	24
1.3.6 le MEEF	25
1.3.7 Vérification	27
1.3.8 Les PV bands	28
1.4 Simulation et modèle	30
1.4.1 Modèle optique de kernel	30
1.4.2 Modèle résine	31
1.5 l'OPC : optical proximity correction	36
1.5.1 Les contraintes du masque	38
1.5.2 L'OPC inversé	39
1.6 Autres techniques utilisées dans la lithographie optique	41
1.6.1 La double exposition	41
	xi

1.6.2	l'Extrême UV	42
2	Phénomène de diffraction et source optique	45
2.1	Formation des images et résolution	45
2.2	Représentation à deux dimensions	52
2.3	Illumination hors axe	53
2.4	Source effective	58
3	La technique d'optimisation Source Masque : état de l'art	59
3.1	Historique de la technique SMO	59
3.2	Les sources simples	60
3.3	Les sources optiques optimisées	61
3.3.1	Sources paramétriques	61
3.3.2	Sources freeform	62
3.3.3	La génération de la source	62
3.4	Flexray	64
3.5	Mesures et validation de la méthode	66
3.5.1	Metal1 C028	66
3.5.2	Vias C020	68
4	Optimisation de la source optique	71
4.1	Impact de la modification de la source	72
4.1.1	Variation de contraste en fonction de la source	72
4.1.2	Impact de σ	76
4.1.3	Symétrie de la source	85
4.2	Optimisation de la source par SMO interne	86
4.2.1	Méthode analytique	86
4.2.2	Méthode géométrique	89
4.3	Mise en pratique de l'optimisation de la source	96
4.3.1	Choix des structures d'optimisation des sources	96
4.3.2	Les sources Optimisées par simulation	97
4.3.3	Résultats mesurées	98
5	Source générée et stabilité	101
5.1	Les différences entre les sources théoriques et les sources mesurées	101
5.2	Etude des erreurs induites par la génération de la source	103
5.2.1	Méthode du DeltaCD et PVband	103
5.2.2	Méthode par décomposition en polynôme de Zernike.	104
5.3	Impact de la source sur le modèle optique	113
5.3.1	Différence de résultats pour différentes sources	113
5.3.2	Lien entre la différence des sources et la divergence du modèle	115
5.4	Application de l'étude des variations de la source	118

6 La cooptimisation	121
6.1 SMO et la lithographie inverse	121
6.2 Le problème du temps de calcul	124
6.3 Source Optimisation et OPC	126
6.4 L'impact de la forme du motif cible et SMTO	129
6.4.1 Impact de la modification des motifs souhaités en SMO	129
6.4.2 Retargeting basé sur le modèle optique	129
6.4.3 Source Mask Target Optimization : le processus SMTO	132
6.4.4 Résultats	133
Conclusion	137
Annexe : articles rédigés durant la thèse	143
A systematic study of source error in source mask optimization	143
Quantification of the difference between sources by Zernike decomposition	151
Enabling 22-nm Logic Node with Advanced RET Solutions	159
Best Focus Shift Mitigation for Extending the Depth of Focus	172
Resist model validity regarding source variation in SMO	183
SMO and retargeting : Source mask target optimization flow	193

Introduction

Aujourd'hui un nouveau monde s'offre à nous. Un monde de technologie, d'information, d'échange. Un monde portable, rapide, et connecté. Nos téléphones vont plus vite de jours en jours, nos voitures sont de plus en plus autonomes, nos tâches ménagères largement facilitées... Et tout ceci est rendu possible grâce à la miniaturisation des composants électroniques.

En dehors de l'aspect économique engendré par cette miniaturisation, c'est avant tout une avancée humaine à laquelle nous assistons. Ces technologies permettent une avancée sociale et culturelle, permettant aux amputés de retrouver l'usage de leurs bras grâce aux avancées en robotique, aux peuples de partager les vidéos accélérant la chute de dictatures comme durant le printemps Arabe, aux voitures de se conduire toutes seules comme en Californie, etc.

La vie moderne est rythmée par la technologie, depuis le téléphone ou l'ordinateur à la machine à laver en passant par la voiture. La plupart des objets de notre quotidien sont plein d'électronique. Tous basés sur un même composant électrique, une même brique élémentaire, le transistor. Depuis des années, les industriels réduisent la taille de ce dernier, le rendant plus rapide, moins cher à fabriquer et une plus grande puissance de calcul.

Cette réduction permet aujourd'hui de pouvoir faire tenir un nombre énorme de ces derniers sur un même circuit électrique. Assemblé ensemble, ils sont ainsi embarqués par milliards sur les puces d'ordinateur.

Cette miniaturisation devient à l'heure actuelle de plus en plus dure. Les technologies actuelles annoncées comme étant en fin de vie depuis plusieurs années doivent aujourd'hui redoubler d'effort en attendant la relève technologique. Différentes étapes de cette miniaturisation posent chaque jour de nouveaux problèmes techniques à résoudre. Parmi ces étapes, une en particulier a de plus en plus de mal à suivre le rythme imposé par l'industrie et par la loi de Moore. Cette étape clef de la fabrication et de l'intégration d'un très grand nombre de microcomposants est la lithographie optique. Utilisant aujourd'hui encore des techniques optiques, elle doit redoubler d'efforts pour ne pas freiner une économie fragile.

Ainsi, afin de continuer à réduire la taille des transistors, chaque élément de cette lithographie doit être pensé, ajusté, optimisé. C'est le cas des résines, c'est le cas des masques, c'est le cas des lentilles, et c'est également le cas des sources lumineuses.

En effet, l'utilisation de source ponctuelle en lithographie optique n'est aujourd'hui plus suffisante pour résoudre les motifs permettant de créer des transistors répon-

dant aux demandes du marché. L'utilisation de source située en dehors de l'axe optique est aujourd'hui nécessaire. Et plus que simplement des sources hors axes, les sources sont aujourd'hui de plus en plus complexes, partiellement cohérentes, et adaptées à un niveau de technologie. Ces sources lumineuses sont donc dépendantes des motifs souhaités, et doivent donc être optimisées.

La technique de cooptimisation masque-source permet justement de relier la forme de la source optique aux motifs présents sur le masque, en modifiant la forme de la source. Cette technique étant une technique nouvelle en microlithographie, il est donc important d'étudier cette modification de source ainsi que les problématiques apportées par son utilisation avant de l'appliquer aux niveaux de technologie future telle que les technologies de demi-pas de grille de longueur 20nm.

En effet, l'utilisation d'une telle technique devient nécessaire pour les nœuds technologiques avancés, et permet un gain dans la qualité de la résolution ainsi que sur la robustesse du procédé. C'est une avancée technologique vitale pour continuer la diminution de la taille des microcomposants.

Cette étude s'est donc attelée à démontrer l'intérêt de la technique de cooptimisation masque-source tant sur un plan théorique que pratique, ainsi que les appareils permettant de l'appliquer. La qualification de la méthode ainsi que les contraintes amenées par sa mise en œuvre seront donc étudiées ici. Elle investiguera les problématiques liées à la modification de la forme de la source optique utilisée en lithographie et proposera des solutions innovantes afin de mieux maîtriser cette optimisation.

Cette thèse ne traitera cependant que de la partie optimisation et modification de la source optique, et ne s'intéressera que rapidement à la modification du masque ou aux autres techniques permettant la diminution de la taille des transistors.

Afin de comprendre la méthode de modification et d'optimisation de la source optique, ce manuscrit va s'articuler en plusieurs parties. Dans un premier temps, le cadre de cette étude sera présenté au travers des différentes techniques permettant une meilleure résolution de la lithographie, ainsi qu'au travers les métriques propres à la lithographie et nécessaires à la qualification de cette dernière.

Dans un second temps, une étude théorique sur la lithographie sera présentée. Les phénomènes optiques sur lesquels est basée la technique d'illumination en dehors de l'axe optique seront étudiés, et le lien entre les sources hors axe et les sources étendues et complexes sera développé. Le phénomène de diffraction limitant la lithographie telle qu'utilisée actuellement permet en effet de mieux comprendre l'intérêt de l'utilisation d'une source hors axe et étendue.

Une troisième partie s'attardera sur le fonctionnement des techniques d'optimisation de la source et présentera différentes techniques mises au point dans le cadre de cette thèse. La technique, basée sur le phénomène de diffraction étudié précédemment sera alors mise en pratique à travers différents exemples.

Une quatrième partie portera sur la mise en œuvre de la modification de la source sur un outil de lithographie. Les limitations induites par l'utilisation de cette nouvelle technique seront alors étudiées dans une cinquième partie et plusieurs techniques permettant de contrôler la génération de source dans le cadre de son optimisation

seront présentées. La technique de décomposition en polynôme de Zernike, technique innovante permettant de comparer différentes sources entre elles sera entre autre exposée.

Enfin, le lien entre l'optimisation de la source et différents éléments externes tels que le masque ou la forme du motif à réaliser sera étudié dans une sixième et dernière partie. Différents processus seront présentés afin d'augmenter la robustesse du procédé de lithographie et permettre sa fabrication. Le lien entre le masque et la source sera ainsi étudié. De même, un processus de cooptimisation entre la source, le masque et la forme finale des motifs souhaité sera exposé.

La présentation de ces différentes techniques et processus mises en place dans le cadre de cette thèse devrait constituer alors une base suffisante pour mieux comprendre les enjeux de la technique d'optimisation de la source, ainsi que présenter la contribution de l'étudiant à la technique.

Chapitre 1

La lithographie optique

La miniaturisation des circuits électronique [1] [2] est une étape clef de la microélectronique [3]. En effet, la réduction de la taille du transistor permet d'incorporer sur les puces électroniques un nombre de plus en plus important de ces derniers, tout en leur permettant d'aller plus vite et de consommer moins [4]. La fabrication de ces transistors ainsi que de l'ensemble du circuit électrique qui gravite autour, est aujourd'hui la clef de cette miniaturisation. L'étape essentielle de ce processus est la fabrication du circuit à proprement parlée est réalisée par un procédé de lithographie optique.

La lithographie optique [5] consiste à transférer les motifs d'un circuit électronique sur une plaque de silicium. C'est une technique complexe demandant de nombreuses optimisations à de nombreux niveaux. La technique d'utilisation des sources pixélisées, dites plus communément optimisation de la source, s'inscrit dans ce processus d'optimisation. Ce chapitre permet de donner un aperçu global de la technique de lithographie optique, énoncée simplement lithographie par la suite. Il décrit les procédés complémentaires de la technique d'optimisation des sources et permet de donner un aperçu des techniques utilisées lors de cette étude.

A l'heure actuelle, les circuits intégrés sont encore réalisés industriellement par la technique de photolithographie. En plus d'être la mieux maîtrisée, cette technique permet une rapidité et une robustesse jusqu'à présent inégalée, atouts qui lui offre les faveurs des industriels qui utilisent la technique de lithographie optique pour la fabrication de la grande majorité des composants semi-conducteurs.

1.1 La technologie CMOS

Lors de la fabrication des microcomposants électroniques, la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) [6] est majoritairement utilisée. Cette technologie décrivant le mode de fabrication d'un couple de transistors a la particularité de s'adapter parfaitement au monde de l'infiniment petit et permet ainsi de créer des circuits intégrés comportant plusieurs milliards de transistors sur une même puce électronique, permettant ainsi des vitesses et des puissances de calculs très importantes [3].

Les deux transistors, représentés en coupe sur la figure 1.1 constituent la base de l'électronique moderne et leur fabrication représente le principal défi de l'industrie du semi-conducteur. Cette figure représente deux transistors, brique élémentaire de la microélectronique, en vue en coupe. La réduction de leur taille afin de permettre une augmentation de la densité du micro composant représente le défi majeur de l'industrie du semiconducteur.

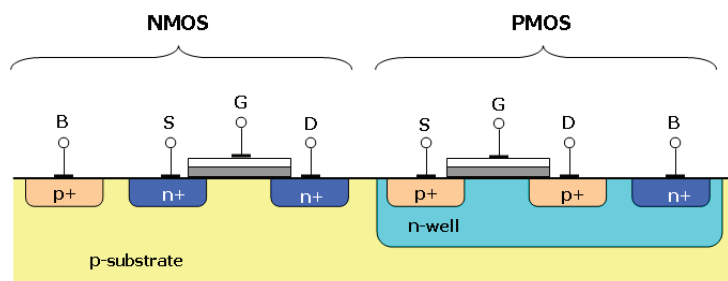


FIGURE 1.1 – Paire de transistor formant une porte logique de type NAND dans une architecture CMOS.

(S = source, G = gate, D = Drain, B = base)

La fabrication de ces transistors représente l'achèvement d'un procédé complexe, qui commence lors du schéma électrique de l'ensemble du circuit, schéma appelé "design" devant répondre à un cahier des charges précis donné par les clients et définissant l'architecture globale du circuit. Par exemple, l'architecture ARM [7] présente dans les smartphones est différente de l'architecture utilisée pour les processeurs d'ordinateur personnel. Elle répond à un certain cahier des charges en terme de positionnement de la mémoire interne SRAM, de voltage utilisé etc. Le design va donc répondre aux besoins de l'utilisation finale de la puce et définir le positionnement des transistors.

Le circuit électrique étant réalisé par simulation [8], il devient alors nécessaire de tenter de le retranscrire sur le wafer. Pour cela, plusieurs couches de métal, d'isolant et de semiconducteur vont être utilisées tel que décrit dans le processus représenté sur le graphique 1.2. Ainsi, de nombreuses couches de matériaux électriques, isolants ou semi conducteurs doivent être superposées par des étapes de croissance

ou de dépôt. Certaines parties de ces couches sont ensuite exposées par un processus de lithographie optique, puis enlevées lors d'un processus de gravure. Certaines parties sont également dopées électriquement afin de réaliser ces transistors. Chaque couche déposée est gravée indépendamment des autres et nécessite donc une lithographie propre. Cette représentation en coupe des transistors ne tient alors pas compte de leur intégration au sein de l'ensemble du circuit. Cette intégration peut cependant être représentée à l'aide d'une vue du dessus du circuit électrique tel que sur la figure 1.3. Ainsi, afin de réaliser les transistors, ces couches vont être traitées séparément et sont appelées niveau de technologie, ou layer.

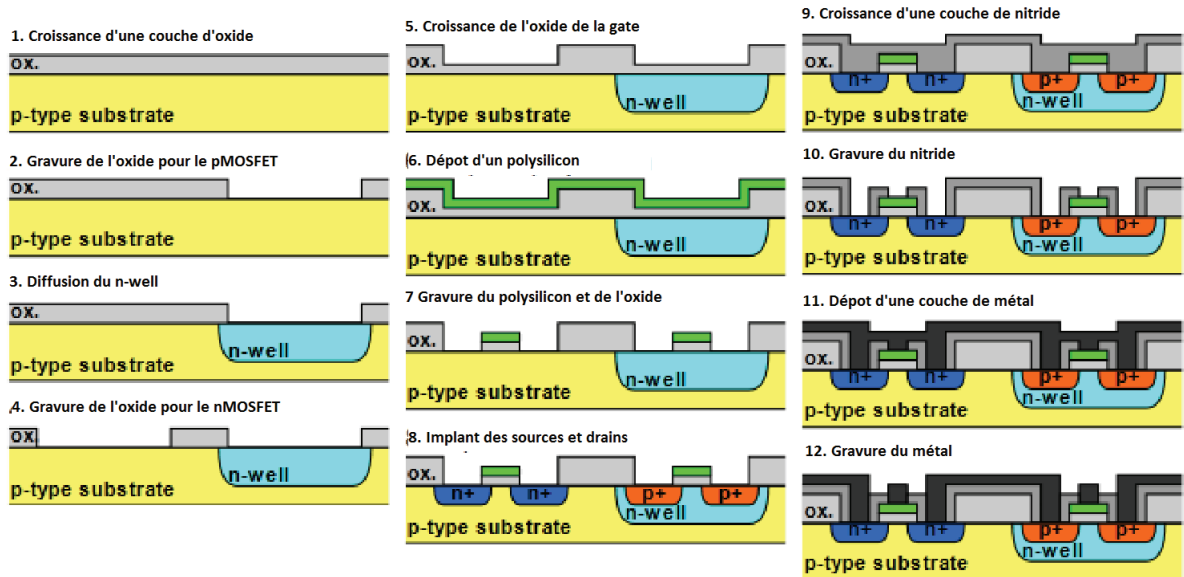


FIGURE 1.2 – Processus de fabrication des transistors de microcomposant.

La miniaturisation des microcomposants donne aujourd'hui des transistors de plus en plus petits. Chaque génération diminue ainsi la taille de la grille du transistor [9] et cette dernière atteint aujourd'hui pour les processeurs à la pointe de la technologie une taille de 28nm. La prochaine génération amènera une taille de grille de 20nm. Cette taille caractéristique de la grille donne son nom à la génération qui est couramment appelée technologie. Ainsi les technologies 28nm et 20nm ont succédé aux technologies 45nm, 65nm etc. Avec les techniques actuelles il devient de plus en plus difficile de résoudre cette taille de grille ainsi que tous les niveaux qui gravitent autour. Cette réduction de la taille des motifs est aujourd'hui encore dictée par la loi de Moore [3] 1.4, ainsi que par l'ITRS (international technology roadmap for semiconductors) [10].

Une fois le design réalisé, la fabrication de prototypes permettant de reproduire le design de façon suffisamment fidèle pour que les propriétés électriques du produit soient

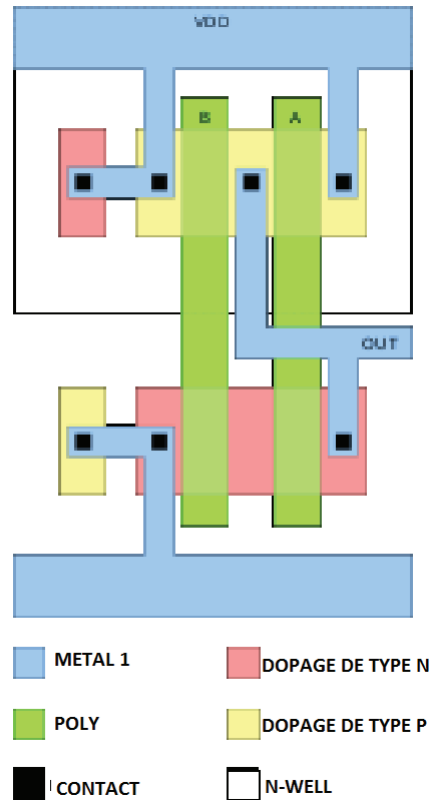


FIGURE 1.3 – Vue du dessus des différents niveaux. L'indépendance des circuits est ici bien illustrée puisque chaque couche du circuit représentée par une couleur est réalisée de façon indépendante des couches inférieures.

gardées est lancée. Ces prototypes vont rencontrer de très nombreux problèmes lors de la fabrication tel que décrit dans la suite de ce manuscrit et plusieurs points de cette fabrication vont alors être modifiés et optimisés afin de réussir à reproduire le plus fidèlement possible le design. Le premier chapitre de cette thèse s'attèle à présenter les principaux problèmes ainsi rencontrés lors de cette étude ainsi que les solutions mis en place par l'industrie pour palier à ces derniers.

Bien que cette fabrication implique des centaines d'étapes différentes, allant de la lithographie à l'intégration, en passant par la gravure, cette thèse ne traite que d'un problème spécifique lié à l'étape de lithographie qui consiste à utiliser des sources lumineuses situées en dehors de l'axe optique.

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law

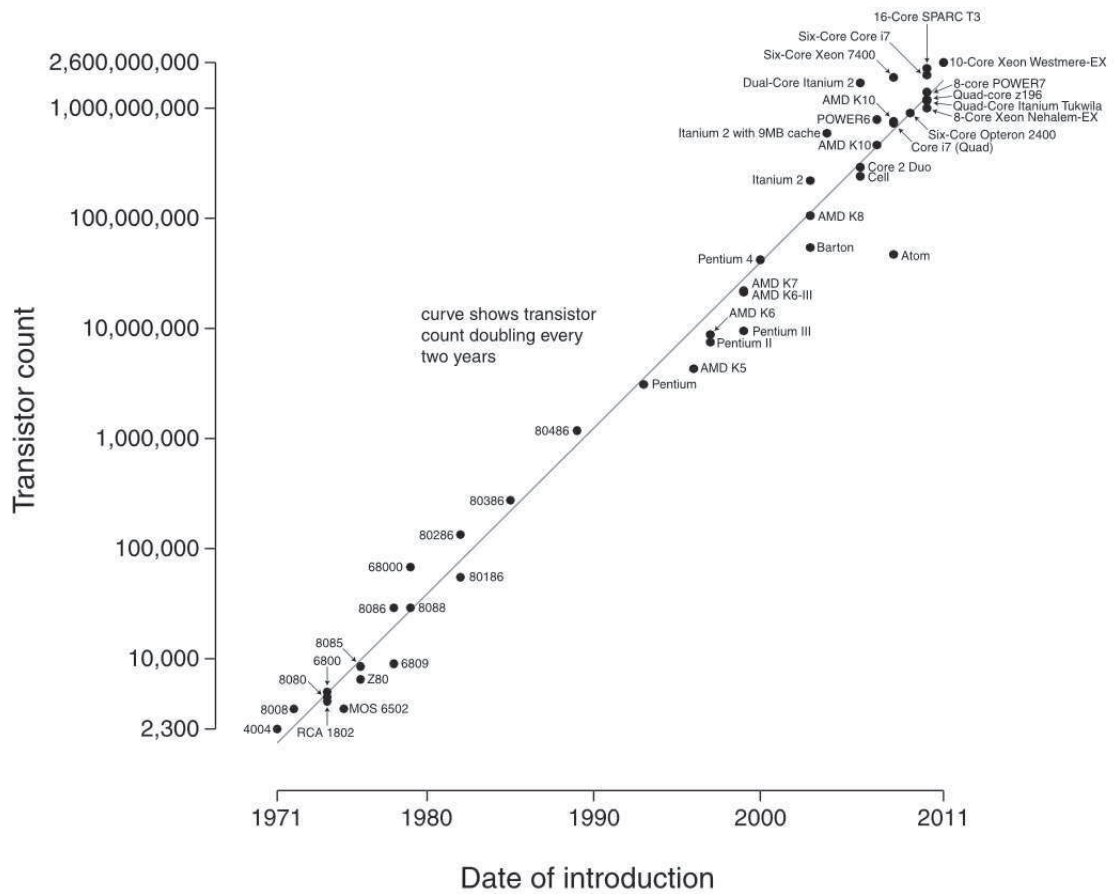


FIGURE 1.4 – Evolution de la densité de transistor au fils du temps ; illustration de la loi de moore.

1.2 La photolithographie

1.2.1 Principes généraux

L'avantage principal de la lithographie optique est de permettre le transfert d'une zone complète d'un masque sur une plaquette de silicium. Cette très grande rapidité de réalisation associée à une réduction considérable des coûts de production rend la méthode très compétitive. Le système optique qui la compose, appelé *stepper* ou *scanner* en fonction de la technologie utilisée, est schématisé sur la figure 1.5. Plusieurs parties distinctes sont à différencier sur ce schéma. Dans un premier temps, la source lumineuse, point principal de cette étude et premier élément du schéma, est ici représentée par les rayons incidents. Il est à noter que cette dernière n'est pas ponctuelle. Le masque est composé de l'ensemble des motifs à imprimer et son image est reproduite sur la plaquette. Il est donc partiellement transparent afin de créer une source optique indirecte. Le système optique constitué d'un jeu de lentilles permet de reproduire l'image du masque sur le wafer tout en la réduisant. Finalement, le wafer placé dans le plan de l'image du masque à travers le système optique va capturer cette dernière afin de la reproduire. Il est recouvert d'une résine photosensible qui permet d'imprimer cette image. Cette représentation n'est absolument pas à l'échelle des appareils utilisés dans l'industrie de pointe, puisque les modules réels peuvent avoir une taille allant jusqu'à plusieurs mètres.

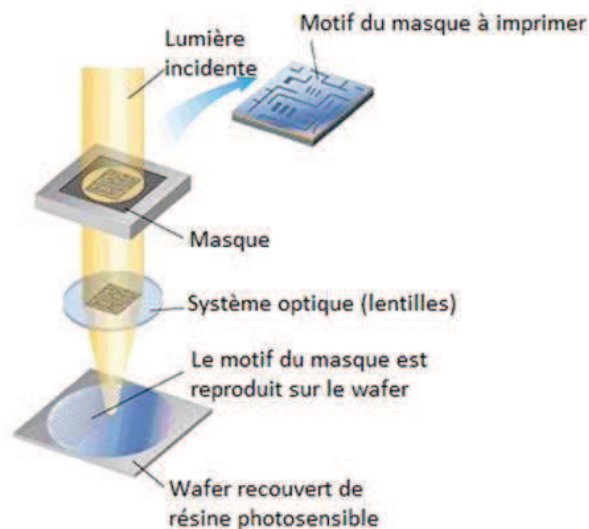


FIGURE 1.5 – Illustration du principe de la lithographie.

Le principe général est que l'image du masque, éclairé par la source, crée une source secondaire qui est reproduite sur la plaquette de silicium par l'intermédiaire du système optique. Afin d'imprimer l'image sur la plaque de silicium, celle-ci est recou-

verte d'une fine couche de résine photosensible, qui sera ensuite développée et gravée dans des étapes ultérieures, non traitées dans le cadre de la thèse.

Les technologies actuelles utilisent en standard une source monochromatique avec une longueur d'onde de 193nm émise par un laser Argon-Fluor (ArF), avec un facteur de réduction de 4 de l'image sur le wafer par rapport aux motifs du masque. [11]

L'illuminateur nous permet d'utiliser une source étendue partiellement cohérente, sujet principal de cette étude, dont les avantages seront démontrés ultérieurement [12] [13].

1.2.2 Le scanner

Les appareils permettant d'effectuer la lithographie optique ont beaucoup évolué au fur et à mesure de l'avancée des technologies. Les premières générations d'appareils utilisaient alors des masques sur lesquels l'ensemble des motifs à reproduire sur le wafer était défini. Une projection optique était effectuée, appelée *steppers* plein champs (figure 1.6(a)) permettant de tout imprimer d'un seul coup. Cependant, l'intensité lumineuse n'était pas suffisamment constante sur l'ensemble du motif. Pour pallier ce problème, la technologie a évolué et les *steppers* ont laissé place aux *scanners*. Ces derniers se différencient par le fait que le masque est éclairé non plus intégralement mais par un faisceau fin parcourant l'ensemble du motif d'un côté à l'autre (figure 1.6). Ceci permet un meilleur contrôle de l'intensité lumineuse et permet également d'utiliser des sources plus puissantes. De plus, ce choix est également lié au fait que les champs utilisés dans l'industrie sont de plus en plus large et l'utilisation d'une fente lumineuse, appelée *slit*, permet d'en garder un meilleur contrôle. Cependant, une perte drastique en terme de temps d'exposition entraînant une augmentation des coûts découle également de cette technique. Aujourd'hui la technique est cependant utilisée pour la quasi totalité des lithographes pour la raison du contrôle de l'intensité lumineuse, critique lors de la lithographie.

En parallèle, la miniaturisation de la taille des motifs à reproduire a fait rapidement augmenter les coûts de fabrication du masque. Pour palier ce problème, des masques plus petits sont fabriqués et utilisés aujourd'hui. Ils correspondent à un motif unique tels une puce ou un processeur. Après chaque illumination le masque est déplacé et le processus est répété au cours d'un procédé dit "*step and repeat*". Un même wafer peut ainsi contenir jusqu'à une centaine de fois la même puce. L'inconvénient d'une telle technique est l'augmentation flagrante du temps de fabrication d'un wafer (figure 1.6(c)). Cette méthode de "*step and repeat*" peut être utilisée sur des *scanners* aussi bien que sur des *steppers*. Dans le cadre de cette étude, les appareils utilisés sont des *scanners* "*step and repeat*", qui utilisent un masque ne représentant qu'une partie du motif et éclairent ce dernier par un faisceau rectiligne le balayant de part en part (figure 1.6(d)).

Il est à noter que, quelle que soit la technologie utilisée, l'ensemble des propriétés optiques du système restent inchangées.

Le système optique utilisé est un système de Köhler [14] [15] [16]. Une représentation schématique est possible tel que sur la figure 1.7. Il est composé d'un conden-

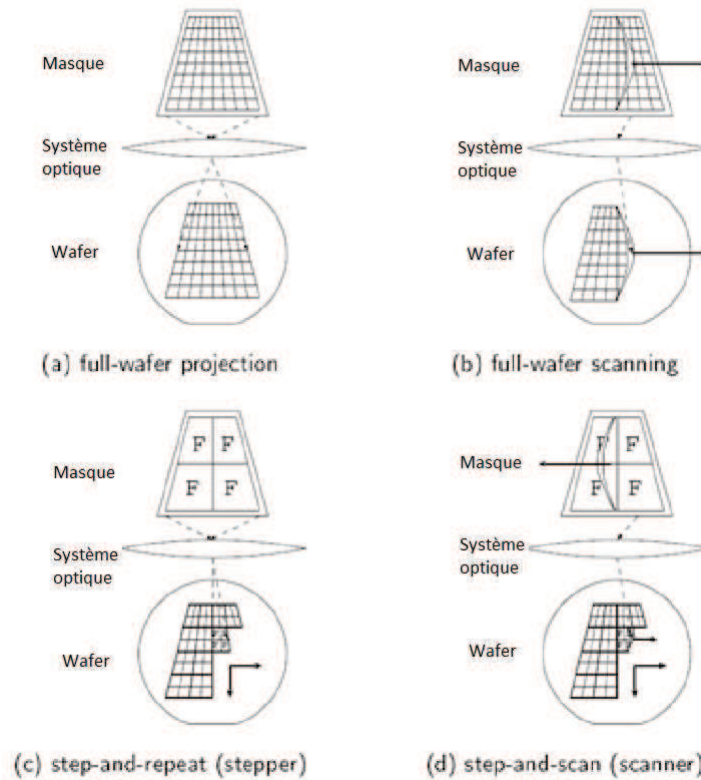


FIGURE 1.6 – Schéma des différents types de scanner

seur permettant d'obtenir une source lumineuse étendue, d'un masque agissant tel un réseau optique et de plusieurs lentilles se comportant comme un filtre passe bas. Ces lentilles permettent de reproduire l'image du masque sur le wafer en créant un cône de lumière de la forme de la source étendue. L'avantage de ce système réside dans le fait que l'image sur le plan du wafer ne retranscrit pas la forme de la source lumineuse utilisée, celle-ci arrivant sur le masque avec des rayons parallèles. Ce système présente de nombreux avantages, tel que permettre l'utilisation d'une source hors axe partiellement cohérente telle qu'abordé par la suite.

1.2.3 Résolution

La limite optique de résolution définie par l'équation ci-dessous, appelée équation de Rayleigh [17], se retrouve sous de nombreuses références de la littérature scientifique. Cette équation est le support de travail principal de la problématique de la lithographie telle que développé dans cette étude :

$$p = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

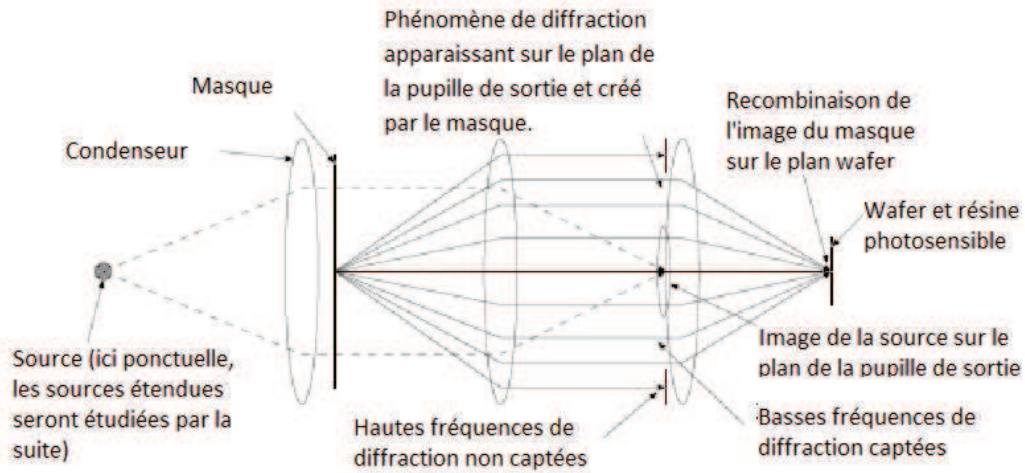


FIGURE 1.7 – Illustration du système optique de Köhler.

Avec p la distance minimale entre deux motifs pour qu'ils soient tous deux résolus, k_1 le critère de qualité de la lithographie, λ la longueur d'onde et NA l'ouverture numérique, de l'anglais "numerical apperture". Il est à noter que la valeur k_1 a initialement été introduite par Lord Rayleigh et possédait la valeur 0.61, ce qui correspond à la limite de résolution dans l'air d'un système non modifié (OPC etc.) pour des objets simples. Aujourd'hui cependant les techniques actuelles permettent de faire varier la valeur de k_1 bien en dessous de 0.61, critère de Rayleigh [17].

Cette définition de la résolution peut être retrouvée grâce à l'étude de l'intensité lumineuse sur le plan image créée par deux fentes présentes sur le masque. En effet, dans les cas limites de résolution, seuls les premiers ordres de diffractions sont captés par la pupille de sortie à l'aide du système optique de Köhler. Dans ce cas, l'optique de Fourier et le principe de Huygens-Freysnel énoncent que l'image de ces fentes va être des fonctions de type sinus cardinal comme représenté sur la figure 1.8. Ainsi, les deux images résultantes λ_1 et λ_2 de deux fentes 1 et 2 donnent l'image de diffraction représenté sur la figure. Il est à noter que chacune des fentes donne un résultat de la forme sinus cardinal. Les deux images sont suffisamment disjointes lorsque le maximum d'intensité de l'une correspond au premier minimum de l'autre. [18] [19]

Afin de pouvoir obtenir deux images distinctes pour ces deux fentes, il est nécessaire que le sommet de la tache de diffraction de l'une corresponde au premier minimum nul de l'autre. L'équation de Rayleigh peut alors être retrouvée et définit la limite de résolution de la lithographie.

Aujourd'hui, la valeur de λ fixée à 193nm [20] est quasiment impossible à faire varier sans passer par des techniques de lithographie extrême UV pour l'instant pas suffisamment mature pour entrer en production [21]. Par ailleurs, il est difficile d'augmenter la valeur de l'ouverture numérique NA au-dessus de 1.35 pour des raisons

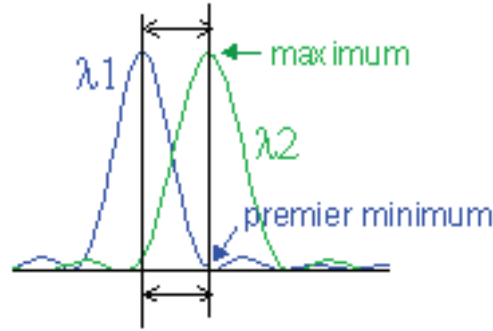


FIGURE 1.8 – Illustration de la limite de résolution.

décrites dans la sous section 1.2.5. Il est donc aisé de comprendre la logique industrielle consistant à diminuer le facteur k_1 afin de produire des circuits de plus en plus petits et de plus en plus performants. L'étude de la théorie de la diffraction de Fraunhofer permet d'expliquer comment diminuer la valeur k_1 et quelle est sa limite théorique. Cette étude sera approfondie dans le chapitre 2.1.

La diminution des distances critiques réalisables étant considérée proportionnelle au facteur k_1 , l'un des plus grands challenges de la lithographie optique à l'heure actuelle est donc de diminuer ce facteur le plus possible, afin de diminuer la taille des motifs critiques et ainsi rendre le circuit plus performant.

1.2.4 Les types de masques

Lors de l'étape de lithographie, le principe général est la reproduction sur la résine les motifs présents sur le masque. Une définition physique du masque est donc importante et cette sous section s'attarde à présenter les différents types de masque utilisés dans l'industrie.

Le masque à changement de phase à atténuation, ou att-PSM (attenuated phase shift mask) (figure 1.9.c) est aujourd'hui un masque couramment utilisé [22]. Celui-ci se distingue du masque dit binaire ou COG (pour "Chrome on Glass") (figure 1.9.a), constitué d'un motif en Chrome sur une couche de Quartz utilisé auparavant dans l'industrie. Il laisse passer au niveau de ses motifs une intensité lumineuse non nulle et déphasée de 180° par rapport aux endroits sans motifs. Ces motifs ont donc un coefficient de transmission T , insuffisant pour l'impression mais participant favorablement à la résolution des motifs. Il est possible de décrire ces derniers mathématiquement par des fonctions portes. Ainsi, un réseau à une dimension peut s'écrire comme suit :

$$O(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } |x - mp| \leq \frac{p}{2}, \\ -t & \text{sinon} \end{cases} \quad m \in \mathbb{Z} \quad (1.2)$$

avec $O(x)$ la fonction de passage du réseau, x la position sur l'axe perpendiculaire au réseau, p le pas tel que le motif fasse la moitié du pas et m un entier naturel.

Le signe négatif illustre le déphasage de 180° et t la transmittance est définie comme suit :

$$t = \begin{cases} 0 & \text{pour un masque COG} \\ \sqrt{T} & \text{pour un masque PSM classique} \end{cases}$$

L'intérêt d'un tel dispositif est de permettre aux ondes qui passent par les zones claires et par les zones de transmission partielle d'interférer de façon destructive à la limite de ces deux zones. Cela a pour effet d'augmenter la pente de l'intensité à cet endroit et de favoriser ainsi la robustesse face au procédé. Cette technique est illustrée sur la figure 1.9.

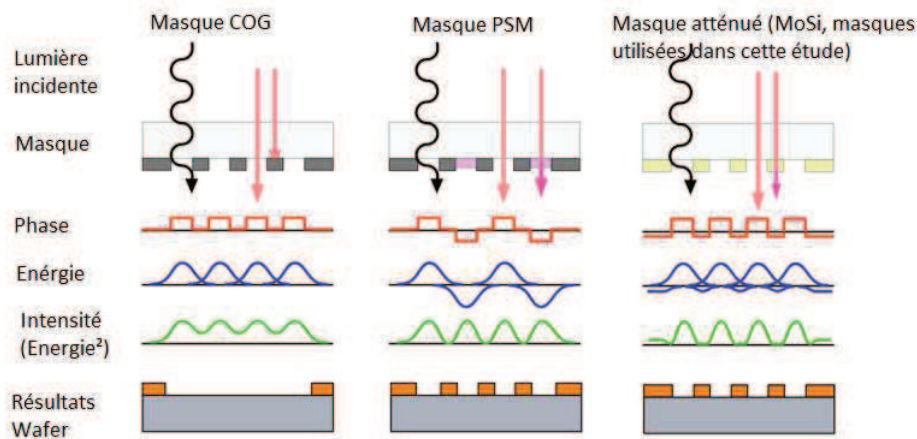


FIGURE 1.9 – Illustration des différences entre le masque COG et le masque PSM.

La fabrication de ces masques a quelque peu évolué au fil des années. Ces masques étaient réalisés dans un premier temps en creusant les zones claires de façon à créer un déphasage de 180°, tandis que la couche de chrome était amoindrie jusqu'à obtenir le facteur de transmission souhaité. Aujourd'hui, afin de garder un meilleur contrôle du procédé de fabrication, le masque est obtenu en remplaçant la couche opaque de chrome des COG par une couche fine de Molybdène Silicium (MoSi), qui permet à la fois le déphasage et l'atténuation de l'intensité. Les masques utilisés lors de cette étude sont des masques de type OMOG (pour Opaque MoSi On Glass, transmission = 1%, phase = 180°) [23] [24] qui permettent de répondre aux contraintes de dessin de plus en plus difficiles à reproduire sur les masques PSM atténués.

Il existe cependant de nombreux autres types de masques, tels que le masque alterné (figure 1.9.b) [25], les masques Rim [26] ou les masques sans chrome appelés "Chromeless PSM" [27], mais ces derniers n'étant pas utilisés dans le cadre de cette thèse ne seront pas décrits ici plus avant.

1.2.5 La lithographie par immersion

Il a été vu dans l'équation de Reighley 1.1 que la limite optique de résolution est directement liée à la valeur de l'ouverture numérique NA , définie par :

$$NA = n \cdot \sin \theta$$

où θ est l'angle d'incidence maximal des rayons se recombinants sur le plan image. Il devient alors évident qu'en augmentant l'indice de réfraction de l'indice n du milieu, l'ouverture numérique est augmentée, de même que la limite de résolution optique [20]. Ceci peut être illustré comme sur la figure 1.10. De nombreux liquides proposent des indices élevés, augmentant ainsi l'ouverture numérique. Toutefois pour des raisons pratiques telles que le coût du liquide, la facilité de rinçage du wafer après immersion, les interactions potentielles entre la résine et le liquide utilisé ou le danger représenté par certains solvants, à l'heure actuelle seuls les systèmes à immersion à eau sont couramment utilisés dans le milieu industriel.

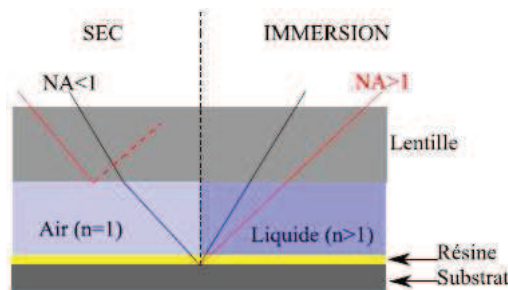


FIGURE 1.10 – Comparaison entre un système de lithographie "sec" et un système à immersion

Ainsi, lors de l'étape de lithographie, la plaquette est plongée dans de l'eau^I, augmentant ainsi l'indice optique du milieu de la lithographie et permettant ainsi de résoudre des motifs plus agressifs.

1.2.6 Résine photosensible

La reproduction des motifs du masque sur la plaquette de silicium par le système optique est possible grâce à une résine photosensible [28]. Cette résine réagit à la lumière dans les parties éclairées, soit en devenant insoluble au révélateur (dite résine positive), soit en devenant soluble (dite résine négative), comme illustré sur la figure 1.11. Il est alors possible d'enlever les parties solubles de la résine afin de retranscrire l'image du masque.

I. Dans les scanner utilisé lors de cette thèse, seul un menisque d'eau est utilisé à l'endroit de l'exposition, afin d'éviter les problèmes de diffusion d'acide de la résine au contact de l'eau. La physique étant la même dans les deux cas, l'image de la plaquette plongée dans l'eau sera gardée par la suite.

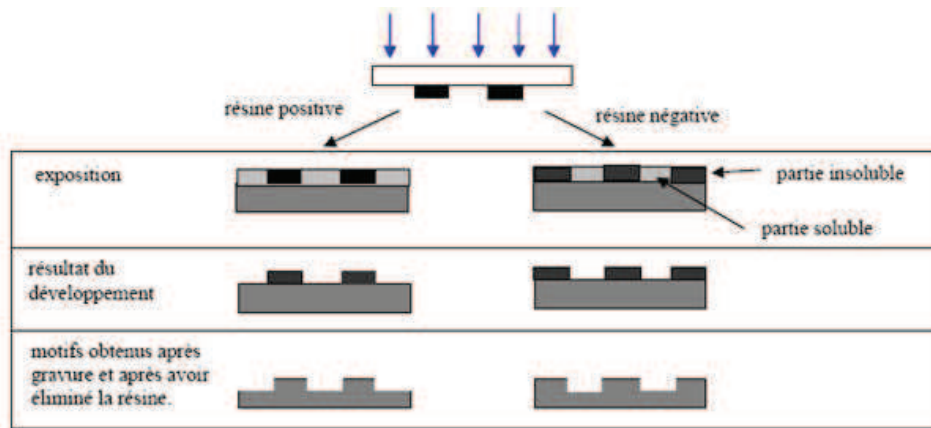


FIGURE 1.11 – Principe de fonctionnement des résines photosensible

Les résines positives possèdent des propriétés de résolutions meilleures que les résines négative et sont par conséquent les plus répandues actuellement dans le milieu industriel [29].

Le type de résine utilisée lors de notre étude est une résine à amplificateur chimique. Elle est composée comme la plupart des résines photosensibles, d'une matrice également appelée liant ou résine, d'un composé actif permettant d'initier la réaction, d'un groupe protecteur et d'un solvant. La matrice est une résine polymère, composant principal de la couche mince. Elle donne par conséquent les propriétés physico-chimiques de cette dernière.

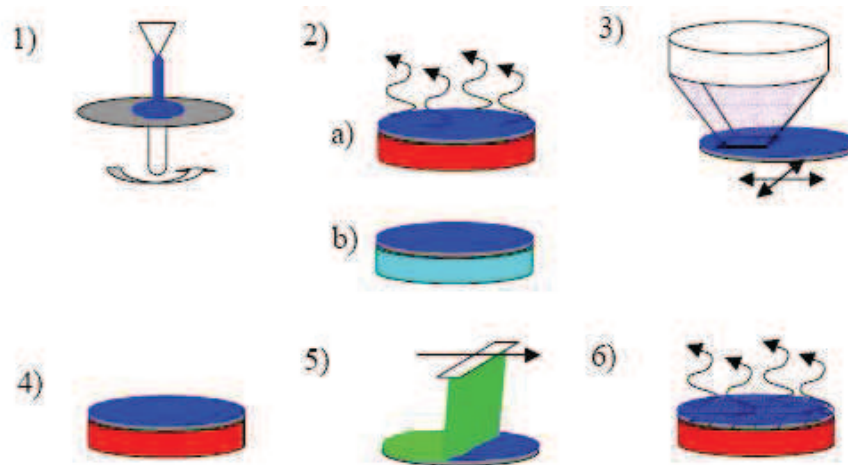


FIGURE 1.12 – Illustration du procédé de dépôt de la résine

Le procédé de dépôt de la résine s'effectue en plusieurs étapes, comme illustré sur la figure 1.12. Dans un premier temps, une couche de résine fine est déposée sur

le wafer de silicium. Ce dépôt est effectué par une méthode dite de "spin-coating", ou d'enduction centrifuge. Une petite quantité de résine est déposée au centre de la plaquette de silicium. En faisant tourner cette dernière à grande vitesse, la résine s'étale en couche mince grâce à la force centrifuge. Lors de la phase d'étalement, le solvant s'évapore, permettant le durcissement de la couche de résine et l'obtention d'un film mince solide (figure 1.12(1)).

Un recuit est effectué ensuite sur la plaquette de silicium grâce à une plaque chauffante. Les quelques résidus de résine s'évaporent (figure 1.12(2)), entraînant la solidification de la matrice de résine.

L'image du masque est ainsi reproduite à travers le système optique. La plaquette, et donc la résine placée sur le plan image de ce système optique, va alors être insolée de telle sorte que certaines zones soient éclairées. Il est possible de schématiser ce phénomène tel que sur la figure 1.12(3).

La résine subit ensuite un second recuit dans le but d'accélérer thermiquement le procédé de décomposition du groupe protecteur par diffusion des acides photo-générés et la libération d'autres acides. Cette étape permet également de limiter les effets produits par les ondes stationnaires sur le profil final des lignes de résine. (Figure 1.12(4))

La partie insolée de la chaîne polymère est alors dissoute dans le révélateur lors du procédé de révélation (figure 1.12(5)). L'image latente laisse ainsi place à l'image concrète du masque (plot de résine non dissoute). Un développeur est déposé sous forme de douche compacte sur la plaquette puis évacué par centrifugation. La plaquette est ensuite rincée.

Finalement, la plaquette subit un dernier recuit qui permet d'éliminer les résidus du développeur et de l'eau de rinçage. (Figure 1.12(6)). Elle est enfin gravée de façon anisotrope à l'aide d'un plasma, lors d'un procédé appelé gravure sèche.

Les niveaux non critiques peuvent subir quant à eux une gravure de type isotrope lors d'un procédé de gravure humide. Cette technique n'ayant pas été utilisée lors de cette thèse ne sera cependant pas détaillé ici.

1.3 Qualité de la lithographie

Afin d'évaluer la qualité de la lithographie des outils de mesure permettant de déterminer et de comparer différents résultats sont définis. Les choix des procédés utilisés, des motifs sélectionnés, de la résine, de l'illumination... nécessitent de faire de nombreuses comparaisons. La partie suivante porte sur la définition et la justification de l'utilisation de plusieurs outils de mesure.

1.3.1 Différentes notions

Le travail sera présenté dans le plan (x, y) , qui est le plan image de la plaquette de silicium, appelé également wafer.

La notion de design, ou dessin du circuit électrique représente le résultat théorique parfait, ne prenant pas en compte les contraintes physiques et les effets de proximité, que l'on souhaite avoir sur le wafer. C'est une carte binaire en deux dimensions, dont la valeur 1 correspond au souhait de matière et la valeur 0 au souhait d'absence de matière. Il est à noter que ce design, contour purement théorique, ne tient pas compte des problèmes inhérents au système et n'est donc pas réalisable.

La notion de "target" représente le contour souhaité intégrant plusieurs paramètres tels que la prévision des déformations induites lors du filtre créé par la pupille, des marges d'erreur plus grande, etc. Cette mise en œuvre est en général assez proche du design mais quelques rectifications peuvent être apportées afin de faciliter la réalisation par lithographie. Pour exemples, des angles arrondis permettent de prévoir l'effet du filtre optique passe-bas créé par le système masque/pupille, des motifs trop petits peuvent être agrandis pour compenser les effets optiques, etc. Plusieurs motivations peuvent entraîner un changement de target appelé "retargeting", ou modification de la forme des motifs souhaités. La principale utilisation de la modification de la target est la compensation des effets liés à la gravure finale. Cependant, un second usage est également répandu et utilisé lors du dernier chapitre de cette thèse, et permet la facilitation de la lithographie afin d'obtenir un résultat de meilleure qualité et plus résistant aux problèmes inhérents au scanner.

La notion de "masque" représente l'image en deux dimensions du masque sur le wafer au travers du système optique. Cette image subit un grandissement de $G = \frac{1}{4}$ pour les technologies actuelles, dû au système optique utilisé. Les valeurs étudiées seront en conséquence $\frac{1}{G}$ fois plus petites que les valeurs réelles sur le masque. De plus, le masque en temps que notion peut différer du masque réel au sens où elle ne tient pas compte des problèmes liés à la fabrication de ce dernier. Dans un but de simplification, l'ensemble du travail réalisé lors de cette étude sera effectué dans un même plan, le plan du wafer et, sauf contre-indication, exclusivement sur cette image optique, avec des dimensions réduites. Le masque est différent de la target pour les raisons abordées dans la sous section 1.5 sur l'OPC.

La notion d'image aérienne à ton continu correspond à la carte d'intensité représentant la valeur de l'intensité lumineuse résultante sur le masque en fonction de sa

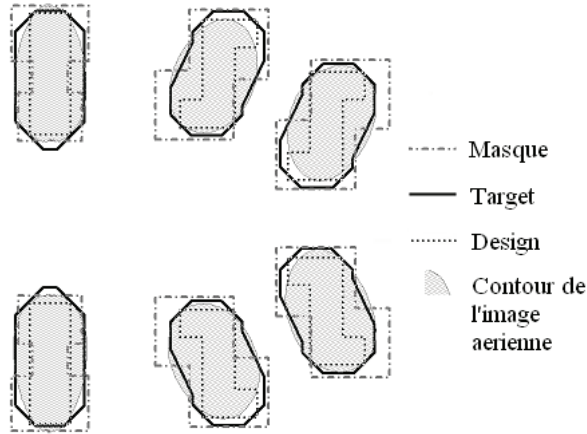


FIGURE 1.13 – Illustration des différentes notions de design, target, masque et image aérienne, représentées ici dans le plan du wafer.

position, tel que $I = f(x, y)$. Cette notion est utile lors des différents calculs de simulation, cependant en pratique elle n'est pas mesurable.

Enfin, l'image aérienne binaire, appelée par la suite simplement image aérienne représente la carte en deux dimension des endroits où l'image aérienne à ton continu est supérieure à l'intensité nécessaire pour que la résine réagisse. C'est donc l'image théorique d'une résine parfaite, et peut être définie comme suit. L'intensité nécessaire pour que la résine réagisse est appelée seuil de résine et permet de calculer cette image aérienne à partir de l'image aérienne à ton continu.

Toutes ses notions sont représenté dans le plan image de la plaquette sur la figure 1.13.

$$A(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } I \geq I_{th} \\ 0 & \text{si } I \leq I_{th} \end{cases} \quad (1.3)$$

Soit $A(x, y)$ représentant le contour pris par la résine, appelé généralement contour de l'image aérienne.

Enfin l'image résine est l'image théorique obtenue sur le wafer en prenant en compte le comportement de la résine. Cette notion sera abordée plus en détail dans la partie 1.4.

1.3.2 Contraste

La méthode mathématique la plus évidente en ce qui concerne la mesure de la qualité de l'image aérienne est le calcul par simulation du contraste, tel que défini par l'équation :

$$contrast = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1.4)$$

avec I_{min} et I_{max} les valeurs des maxima et minima locaux d'intensité.

En pratique, cette mesure présente de nombreuses limitations. Afin de répondre à leurs besoins, les industriels utilisent aujourd'hui d'autres critères de mesure.

1.3.3 Variation de dose

L'un des problèmes de la lithographie réside dans l'instabilité des scanners [30]. Comme tout appareil, ce dernier n'est pas parfait et il arrive que l'intensité lumineuse émise par la source optique ne soit pas parfaitement constante, d'une fois sur l'autre, d'un appareil à l'autre ou en fonction de l'endroit insolé. Ces variations, allant de moins de 2% à une dizaine de pourcents sur les dernières générations de scanner et prises en compte par les fabricants de scanner, sont parfaitement définies pour chaque niveau de technologie.

Toutefois il est important de mesurer l'impact d'une telle variation d'intensité lumineuse, appelée dose, sur l'image aérienne. En effet, si le seuil de la résine est considéré constant, alors, comme illustré sur le graphique 1.14, le fait d'augmenter la dose multiplie proportionnellement l'intensité de l'image aérienne. Si la valeur du seuil de la résine reste constante, la limite de l'image aérienne sur la résine va alors varier en conséquence.

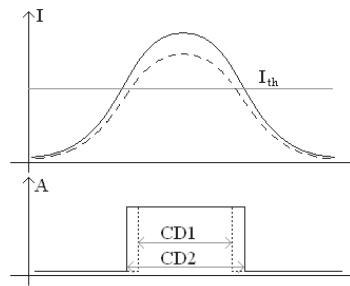


FIGURE 1.14 – Illustration de l'influence de la variation d'intensité sur la taille d'une ligne de largeur CD.

Deux intensités lumineuses différentes vont donner deux CD différents pour une même valeur de constante de résine Threshold.

Il est intéressant de noter que la résistance aux variations de dose est liée au premier ordre à la pente de courbe d'intensité. [16] Ainsi, lors de l'optimisation du processus de fabrication, il sera plus facile de s'attarder sur cette valeur plus simple à calculer. La notion de latitude d'exposition, notée EL, et couramment appelée par le terme anglais *exposure latitude*, est définie comme étant la limite de variation d'intensité maximale entraînant la variation maximale de la taille d'une structure de dimension donnée. Il est possible par exemple de définir la variation de dose maximale entraînant une variation de dimension critique de 10% des motifs comme étant une variation de 5% d'intensité. Cette limitation est fixée par le lithographe comme étant un pourcentage de variation de la dimension critique CD. Les variations d'intensité

entraînant les variations de CD maximales sont alors observées. La latitude d'exposition correspond à la différence entre les limites supérieure et inférieure d'intensité lumineuse permettant une modification tolérée de la taille du motif.

Un des paramètres fortement lié à l'exposition latitude, la valeur de la pente de l'intensité lumineuse dans la résine au niveau du seuil, permet d'obtenir au premier ordre cette dernière de manière relativement simple. En effet, la variation de la dose entraînant une variation de la position du bord du motifs directement lié à la pente d'intensité, il est possible de remonter ainsi à la latitude d'exposition grâce à cette valeur. En pratique, l'image normalisée du logarithme de la pente (NILS pour Normalize Image Log Slope) est utilisée et définie par l'équation 1.5 :

$$NILS = \frac{CD}{I_{threshold}} \left. \frac{dI}{dx} \right|_{I_{threshold}} \quad (1.5)$$

1.3.4 Défocus et profondeur de champ

En plus de la variation de dose, la notion de "défocus" est un second paramètre très important lors de l'étude de la qualité de la lithographie. En effet, le système étant un système optique, les résultats sont donc calculés dans le cas où le plan wafer se trouve parfaitement au niveau du plan focal de la dernière lentille (cf. figure 1.7). Cependant, il peut arriver que lors du procédé de lithographie la plaque soit légèrement déplacée suivant l'axe optique. Les systèmes actuels prévoient par exemple une variation de focus de l'ordre d'une 50aine de nanomètre. Il devient alors important de prévoir et de mesurer les impacts d'un tel déplacement afin de connaître les valeurs acceptables de ce défocus. [30]

Il est possible de calculer le défocus maximal théorique pour une source cohérente étendue en supposant que la déformation, en fonction de la profondeur de champ, soit liée au fait que les faisceaux placés sur l'axe optique et les faisceaux provenant de l'extrémité de la pupille n'interagissent pas de la même façon en dehors du focus optimal. Sur le graphe 1.15 les faisceaux verticaux provenant du centre de la pupille de sortie et ceux en biais provenant d'extrémité de la pupille de sortie et interférant en z_0 sont en phase. En se décalant d'une profondeur de champs RU [16], la différence de marche entre les deux rayons peut être calculée par la formule suivante :

$$\Delta_{marche} = RU - RU \cos(\theta) \quad (1.6)$$

Lorsque ces deux rayons ne sont plus en phase, ils interagissent de façon destructive, limitant ainsi la qualité du rendu de la lithographie en dehors du focus nominal. La limite d'interaction constructive entre ces deux rayons est définie comme suit par l'optique ondulatoire :

$$\Delta_{marchemax} = \frac{\lambda}{4} \quad (1.7)$$

En combinant les équations 1.6 et 1.7, le résultat suivant est obtenu :

$$\begin{aligned}
 RU &= \frac{\lambda}{4} \frac{1}{1 - \cos(\theta)} \\
 &= \frac{\lambda}{4} \frac{1}{2 \sin^2(\theta/2)} \\
 &\approx \frac{\lambda}{4} \frac{1}{2 (NA/2)^2} \\
 &= \frac{\lambda}{2 NA^2}
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

La valeur RU est appelée unité de Rayleigh de focus. Elle représente la valeur maximale du défocus applicable à une technologie, indépendamment du design et du masque. Par exemple, pour un scanner avec une longueur d'onde de $\lambda = 193nm$ et une ouverture numérique de $NA = 1.35$, la valeur de RU est de 53nm.

Il est à noter que lors de l'utilisation d'une source hors axe tel que décrit dans la suite de ce manuscrit, le rayon provenant du centre de la pupille n'est plus présent. Ainsi, chaque source hors axe combinée à différents motifs va donner un ensemble de rayons lumineux arrivant sur le plan wafer différent. Il est donc particulièrement compliqué d'étudier l'ensemble des cas de figure possibles. Certains cas de figure seront toutefois étudiés dans la partie 3.2.

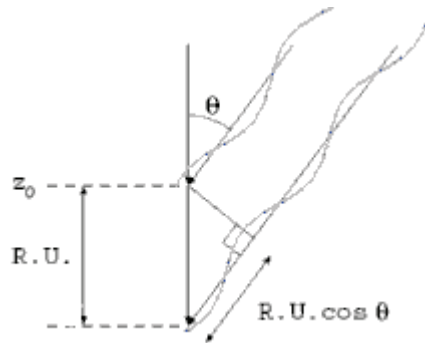


FIGURE 1.15 – Illustration de l'unité de Rayleigh. La profondeur de champ est proportionnelle à la longueur d'onde et inversement proportionnelle au carré de l'ouverture numérique.

En pratique, les contours de l'image aérienne sont étudiés plus que les interactions entre les rayons. Ainsi, à l'aide de simulation, les images aériennes ou résines sont calculées et la variation de la taille des motifs à différentes valeurs de défocus est étudiée. De même que pour la variation de dose, le défocus maximal nécessaire pour une variation fixée de la taille des motifs est étudié à l'aide de simulations. Ainsi, il est possible de définir une valeur limite de défocus entraînant une variation maximale de la taille des motifs.

1.3.5 Courbes de Bossung et Process Window

Les deux principaux paramètres de mesure de la qualité d'un procédé étant définis selon un même critère, la variation maximale de taille des motifs, il devient intéressant de tracer la carte 2D de la taille du motif en fonction de la dose et du défocus [31] [16]. Cette courbe représentant la fonction $CD = f(defocus, dose)$ est représentée sur le graphique 1.16 avec le défocus en abscisse et la dose en ordonnée.

Les courbes de limites de tolérances supérieure et inférieure de la variation de la taille d'un motif peuvent être tracées en suivant les points de la courbe tridimensionnelle ayant les valeurs en question. Le calcul de l'aire comprise entre les deux courbes limites est effectué. Cependant, afin de rester en accord avec les contraintes physiques définies par le milieu industriel, seule une surface définie entre ces deux courbes sera intéressante. Cette surface peut être un rectangle, un disque ou une ellipse comme sur la figure 1.16. Cette aire est appelée fenêtre de procédé, notée PW pour l'anglais "process window", pouvant être tracée pour différentes tolérances de variations maximales de CD. Dans toute la suite de la thèse, cette métrique sera étudiée comme étant le principal critère de qualité de la lithographie. Plus l'aire de cette surface sera grande, meilleure sera jugée la qualité de la lithographie.

Afin de rendre cela plus lisible, le tracé des courbes de Bossung, qui sont les différentes courbes de la taille du motif en fonction du défocus pour plusieurs valeurs de dose est étudié, comme représenté sur la figure 1.17. En définissant les valeurs maximale et minimale de la taille du motif, il est possible de tracer la variation maximale de dose EL en fonction de la profondeur de champ. En effet, pour chaque valeur de profondeur de champ, il est possible de mesurer directement sur ce graphique quelles courbes, donc quelles valeurs de dose, sont comprises entre les droites représentant les valeurs maximale et minimale de CD toléré. Cette courbe appelé EL-DOF représentant donc la fonction $EL = f(DOF)$ est tracée sur la figure 1.18.

Toutes les définitions données ci-dessus permettent de caractériser aisément un motif unique. Cependant, en pratique, les motifs sont complexes et nombreux. Il devient alors nécessaire d'étudier les process window pour tout ou partie de ces motifs. Les différentes fenêtres de procédées sont ensuite superposées pour les motifs intéressants, et la process window commune à tous ces motifs peut être tracée. Elle est appelée "overlapping process window" (figure 1.19).

Les critères étudiés durant cette thèse seront principalement liés à la taille de la fenêtre de procédé. De plus, les fenêtres de procédées utilisés dans le milieu industriel sont en général elliptiques. Cependant, plus que sa taille, ce sont généralement les valeurs qui la caractérisent, soit les valeurs de grand axe et de petit axe. Ces valeurs représentant la profondeur de champ dans le cas d'une dose idéale, appelé simplement DOF par la suite, et à moindre échelle la valeur de latitude d'exposition, appelée dose max par la suite.

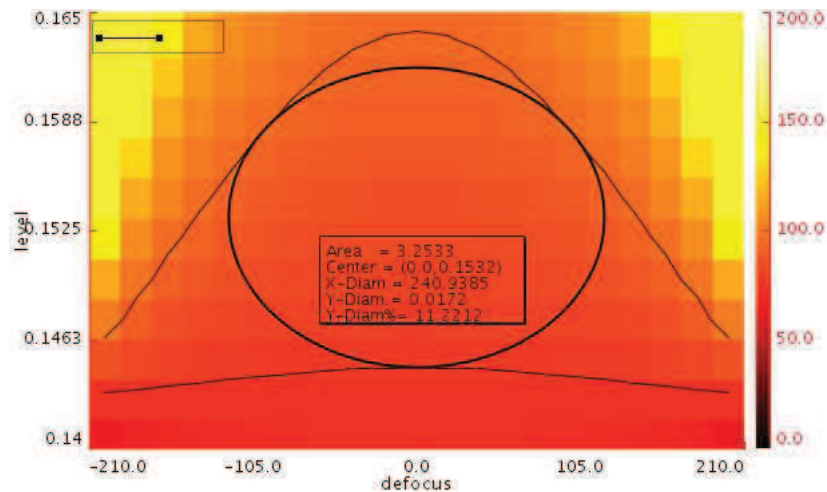


FIGURE 1.16 – Exemple de process window pour un motif ligne/espace aux dimensions caractéristiques 85/150. La process window est mesurée ici à $\pm 15nm$. On trace donc la taille du CD en fonction du défocus en abscisse et de la dose en ordonnée.

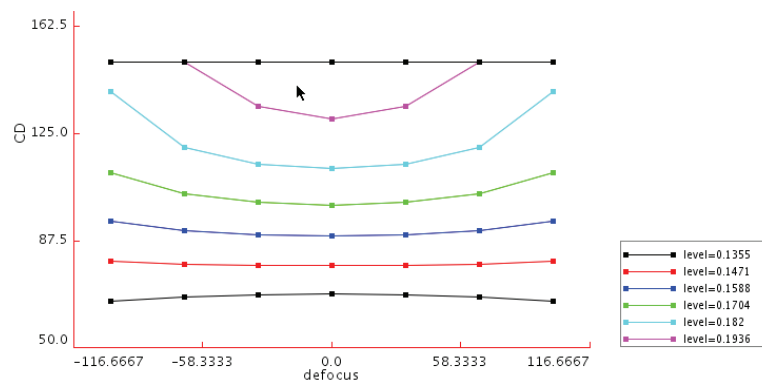


FIGURE 1.17 – Exemple de courbe de Bossung. Chaque ligne représente une valeur de dose fixée. On trace ensuite l'évolution du CD en fonction du défocus.

1.3.6 le MEEF

Lors de la fabrication d'un masque, il peut également s'avérer que les détails des motifs de ce dernier ne soient pas parfaitement identiques aux motifs souhaités. L'impact d'une telle variation peut être prévu en mesurant le MEEF, de *mask error enhancement factor*. Le MEEF est défini tel que :

$$MEEF = \frac{\delta CD_{wafer}}{\delta CD_{motifdumasque} * G}$$

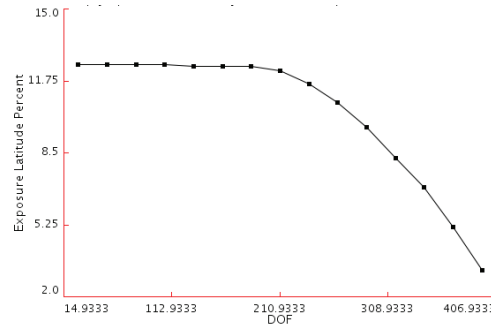


FIGURE 1.18 – Exemple de courbe EL-DOF. On trace donc la taille maximum de variation de dose en fonction du défocus pour une variation de CD fixée.

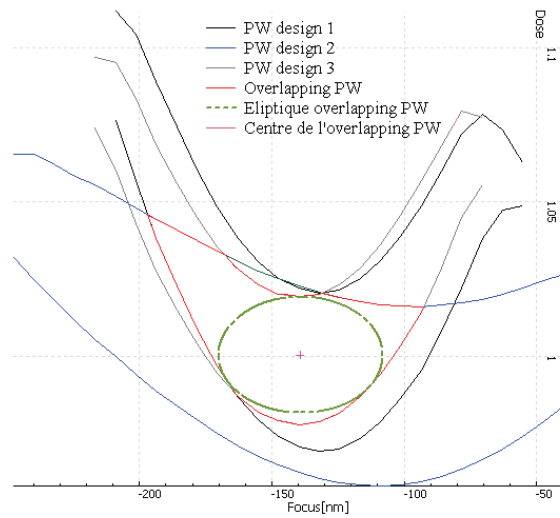


FIGURE 1.19 – Exemple d'overlapping process window. En superposant plusieurs fenêtres de procédé, on peut tracer la fenêtre de procédé de l'ensemble des motifs étudiés.

avec δCD_{wafer} la variation de la distance critique CD de l'anglais "critical dimension" induite sur le wafer par une variation $\delta CD_{motifdumasque}$ du motif sur le masque. Le masque étant un facteur $\frac{1}{G}$ fois plus grand que l'image wafer, la prise en compte du facteur de grandissement G est incontournable. En pratique, δCD_{masque} est normalisé en étudiant son image sur le plan wafer. La variation de CD de l'image du masque sur le plan wafer est appelée δCD_{masque} , représentée sur la figure 1.20. La formule suivante est alors obtenue :

$$MEEF = \frac{\delta CD_{wafer}}{\delta CD_{masque}} \quad (1.9)$$

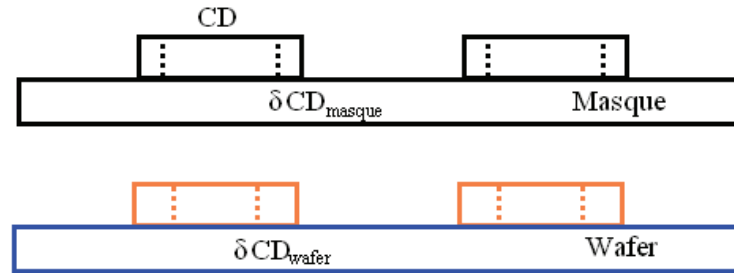


FIGURE 1.20 – Illustration de la mesure du MEEF. Pour une variation de CD sur le masque, la variation de CD sur le wafer n'est pas nécessairement proportionnelle.

Dans l'idéal, le MEEF devrait toujours avoir une valeur de 1. Cependant, les effets de proximité étant non linéaires pour les valeurs de CD très faibles, le MEEF est généralement supérieur à 1. Par ailleurs, la valeur du MEEF dépend de la forme du design sur lequel il est mesuré. Ainsi, la valeur de MEEF la plus élevée sur l'ensemble du design sera généralement prise en compte pour évaluer la qualité d'un procédé.

Le MEEF peut également être assimilé à une augmentation de la dose, cependant la mesure s'effectue le plus souvent en complément de la process window. Le MEEF est le second critère de qualité pris en compte lors de la qualité des résultats des simulations de la lithographie.

1.3.7 Vérification

Il est établi que le contour de l'image aérienne peut varier en fonction du défocus et de la variation de dose. Ces variations peuvent être simulées ou calculées, afin de prévoir le positionnement des nouveaux contours. Jusqu'à présent, seul un changement de taille relative des éléments du design sont pris en compte. Mais dans certains cas de design complexe, les valeurs relatives ainsi constatées ne sont plus suffisantes ou complètes. Par exemple, sur la figure 1.21, si la barre du centre varie relativement de 10% par rapport à sa largeur d'origine, elle entrera en contact avec les motifs qui l'entourent aux extrémités de la ligne. Des valeurs absolues définies en fonction du ou des motifs avoisinant doivent être introduites.

Des détecteurs appelés ORC (pour l'anglais Optical Rule Check) sont donc introduits afin de pallier les problèmes induits par l'utilisation des métriques précédentes. Cela consiste à vérifier sur l'ensemble des contours de l'image aérienne qu'aucun contour ne se retrouve à une distance trop proche d'un autre, afin d'éviter l'apparition de problèmes lors de la lithographie. Les détecteurs suivants peuvent par exemple être utilisés (liste non exhaustive) :

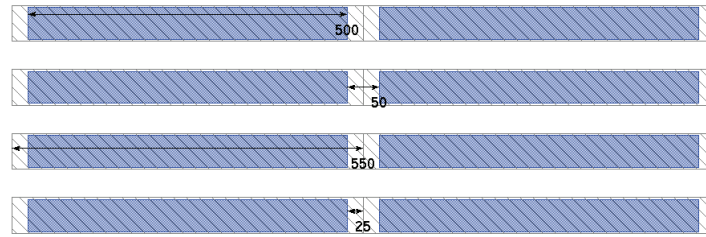


FIGURE 1.21 – Si l'on tolère 10% de marge d'erreur par rapport au design, horizontalement, on tolère que les motifs se rejoignent. Ceci n'est évidemment pas acceptable.

- Distance minimum par rapport au contour le plus proche.
- Distance maximum par rapport à sa position théorique.
- Largeur minimum d'une ligne.
- Impression de motifs qui n'existent pas sur le design.
- ...

Il est également possible de spécifier les endroits devant être étudiés par tel ou tel détecteur. Par exemple, des bouts de lignes peuvent être identifiés comme n'ayant pas les mêmes tolérances que les côtés des lignes. Les valeurs de focus et de dose sont ensuite modifiées et regardées afin d'identifier les détecteurs dont la réponse est positive, de même que la variation de taille des lignes serait étudiée avec les métriques définies précédemment. Une nouvelle process window basée sur l'ensemble de ces détecteurs peut alors être définie.

Dans l'industrie, l'utilisation des détecteurs est la méthode de qualification d'un produit la plus souvent utilisée. En effet, ces derniers pouvant être spécifiés pour un motif particulier ils offrent une flexibilité d'utilisation très largement supérieure aux autres modes de mesures des résultats. Cependant, comme de nombreux cas étudiés durant cette thèse sont constitués d'un ou de quelques motifs simples, les détecteurs ne seront ici que peu utilisés.

1.3.8 Les PV bands

Une autre manière de mesurer la fenêtre de procédé est d'utiliser les "pv-bands". Les pv-bands sont créées à partir des images aériennes prises à différentes doses et à différents focus. Sont ensuite prises les images les plus éloignées de l'image aux meilleures conditions dans les deux directions pour créer une bande autour de cette dernière, appelée pv-band. Les PV bands dépendant grandement des conditions utilisées pour tracer l'ensemble des images, une PV band ne peut être utilisée toute seule pour illustrer un process, mais sera grandement utilisée pour comparer deux process différents, tels que deux OPC, deux sources etc. Un exemple de pvbands sont représenté sur la figure 1.22. Il est possible de tracer cette dernière en se basant sur

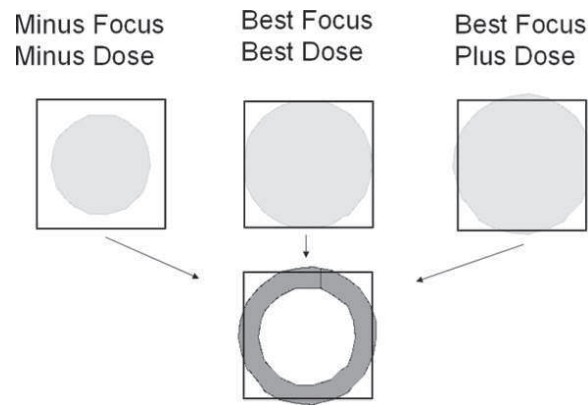


FIGURE 1.22 – Illustration des pv-bands. Trois conditions différentes de focus donnent trois images aériennes différentes. La différence entre les images les plus éloignées donne la pvband

les contours résines pour différentes valeurs de dose et de défocus.

1.4 Simulation et modèle

Pour un système optique (longueur d'onde et ouverture numérique) donné, le nombre d'ordres de diffraction récupéré par la pupille est limité et dépend de la taille des motifs souhaités (voir partie 2.1). La pupille effectue alors un filtre passe-bas du spectre du design, modifiant ainsi la forme de l'image obtenue sur le wafer lorsque les rayons se recombinaient. Afin de prévoir l'impact d'un tel filtre, le calcul de l'image aérienne est possible pour des motifs simples à une dimension de type ligne/espace en utilisant le modèle d'Hopkins défini par les équations 2.19 et 2.20 étudié par la suite. Toutefois, pour des motifs plus compliqués tels que des designs complexes en deux dimensions, le temps nécessaire pour calculer le résultat serait bien trop long. Par souci de rapidité, des simulations optiques sont utilisées pour déterminer l'image aérienne.

1.4.1 Modèle optique de kernel

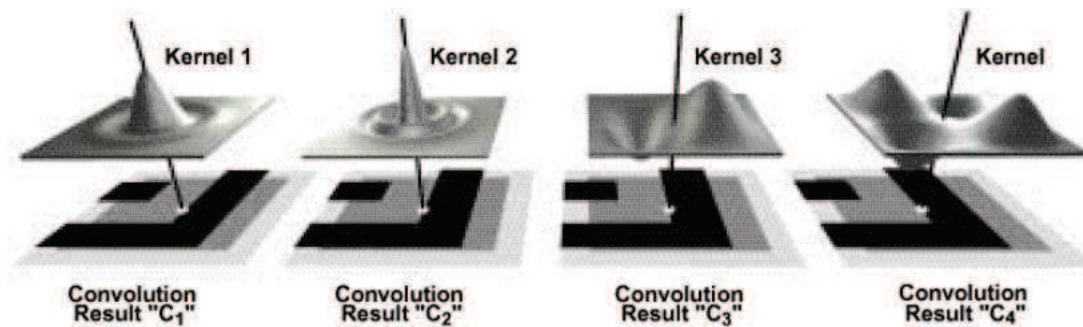


FIGURE 1.23 – Illustration de la convolution d'un motif par une série de Kernel

Afin d'obtenir un résultat de contour de l'image aérienne, des méthodes de simulations rigoureuses telles que la méthode de FDTD (finite difference time domain) peuvent être employées. Mais, pour des raisons de temps de calcul trop longs, cette méthode est très peu appliquée à l'industrie. Dans le cadre de cette thèse, certaines simulations ont toutefois été réalisées avec cette méthode à l'aide du logiciel Panoramic.

En conséquence, dans l'industrie, l'utilisation de la méthode de Kernel s'est généralisée. Cette méthode approximative consiste à effectuer une convolution de l'image du masque par une série de Kernel [32], afin d'obtenir une approximation de l'image aérienne (voir figure 1.23 et 1.24). Les résultats des différentes convolutions avec chaque Kernel sont alors additionnés pour obtenir un résultat approché de l'image aérienne. Plus le nombre de Kernel est important, plus le calcul sera long, mais plus le résultat sera précis. La rigueur de cette méthode ne sera pas étudiée lors de cette thèse, bien que les modèles soient utilisés pour toutes les simulations effectuées.

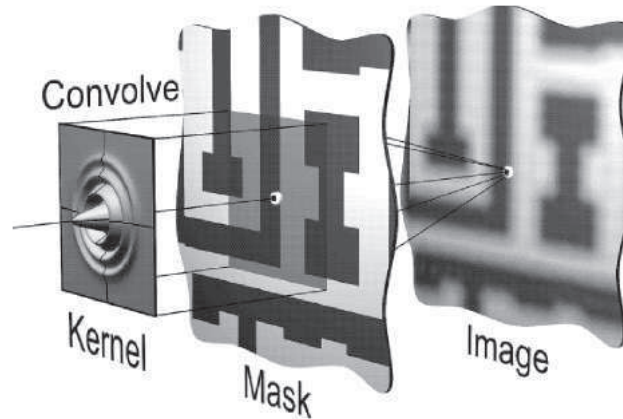


FIGURE 1.24 – Illustration de l’obtention de l’image aérienne par convolution d’une fonction de type Kernel.

L’image aérienne ainsi obtenue représente alors la carte d’intensité lumineuse au niveau du wafer, mais ne rend pas compte de l’interaction de la lumière avec la résine et les couches fines (BARC, TARC, ...) qui sont déposées sur le wafer. L’introduction d’un modèle résine est alors nécessaire.

1.4.2 Modèle résine

La littérature offre de nombreuses façons de modéliser les différentes étapes de la formation de l’image dans l’épaisseur de résine. Par exemple, sur la figure 1.25, deux étapes du transfert de l’image dans la résine sont représentées. La première (Fig. 1.25(a)) est le recuit après exposition qui a plusieurs utilités (voir figure 1.12) dont l’accélération de la réaction chimique, c’est-à-dire que les acides photo-générés sont diffusés pour activer la solubilité de la partie exposée du film de résine. La deuxième utilité du recuit après exposition est de lisser les profils à la transition entre la partie insolée ou non (nécessaire lors de la présence d’ondes planes stationnaires dans la résine). Cette étape se fait notamment par contact entre une plaque chauffante et la plaquette de silicium. La seconde étape est celle du développement. Celle-ci se fait au moyen d’un développeur liquide déposé à la surface de la résine. Le modèle de développement segmenté de C. Mack [33] présent dans la littérature est représenté sur la figure 1.25(b). Il décompose l’étape de développement en une composante verticale (représentant la pénétration du développeur dans l’épaisseur de résine) et une composante horizontale (représentant la dissolution de l’inhibiteur horizontalement). La séparation en deux composantes permet de décrire la pente des plots de résine après développement.

De nombreux modèles décrivant les phénomènes de diffusion des espèces lors de l’étape de recuit après exposition [34], ou les effets du développement sur le profil tridimensionnel des lignes sont présents dans la littérature [35]. Le problème majeur

de ces modèles est qu'ils sont difficiles à calibrer. En effet, ils comportent pour la plupart un nombre élevé de paramètres (par exemple pour le modèle de D.J. Kim, il est nécessaire de calibrer dix paramètres pour décrire correctement l'étape du développement). De plus, leur temps de simulation est élevé. C'est pourquoi les outils d'OPC utilisent des modèles dits simplifiés. Ces modèles ne retranscrivent donc pas les caractéristiques physiques des différentes étapes du transfert des motifs dans la résine. Ils représentent le transfert dans sa globalité et sont spécifiques à un procédé donné.

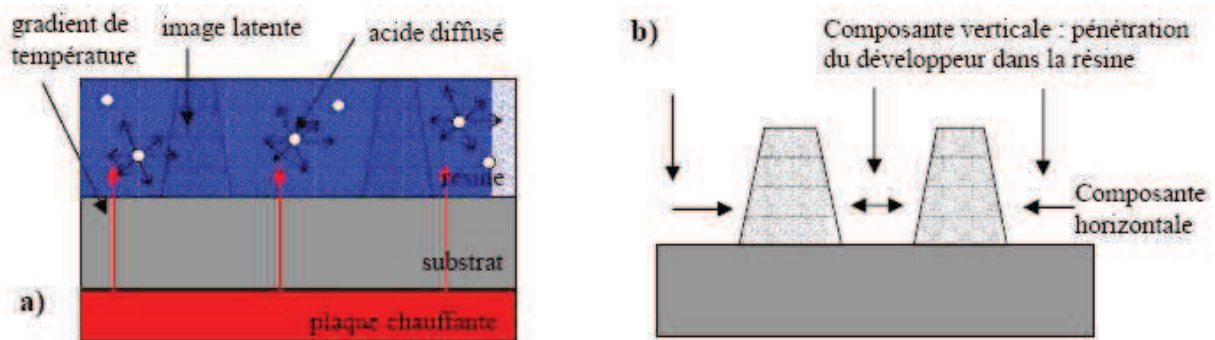


FIGURE 1.25 – Schéma illustrant l'étape de recuit après exposition (a) et l'étape de développement de la résine selon le modèle segmenté de C. Mack (b).

Modèle à seuil constant

La méthode la plus simple est de modéliser l'impression dans la résine par l'extraction du profil de l'image aérienne pour une valeur d'intensité donnée. Le profil des motifs imprimés dans la résine est donc extrait à partir de l'image aérienne pour une valeur seuil unique (Fig. 1.26). Cette approche revient à considérer que la résine possède un contraste infini.

Modèles à seuil variable

Les modèles à seuil variable, connus sous le nom de VTR (de l'anglais Variable Threshold Resist) ou VT5 (Variable Threshold 5), ont été introduits par N. Cobb [36]. Ces modèles sont disponibles dans le logiciel Calibre et sont la propriété de Mentor Graphics. Le seuil d'impression est décrit, non plus comme une constante, mais comme une fonction des paramètres de l'image aérienne. Les paramètres optiques sont les suivants : l'intensité minimale (notée par la suite " I_{min} "), l'intensité maximale (notée " I_{max} "), la pente de l'image aérienne (notée " Slope "), et la courbure de l'image aérienne (notée " Factor "), paramètres correspondant à la courbure du contour du motif obtenue au point de simulation (cf. Fig 1.27). Les paramètres sont extraits le long du profil de l'image aérienne de sorte que (cf. Fig 1-9) :

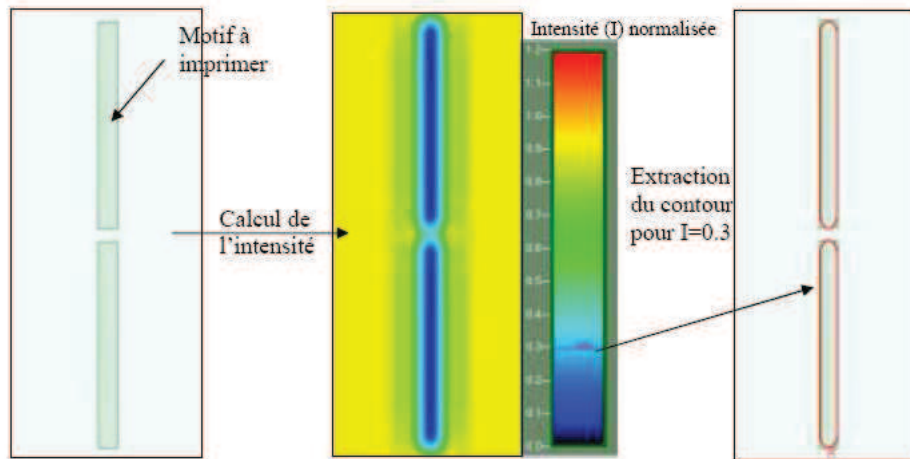


FIGURE 1.26 – Méthode d'extraction du contour à seuil constant

- l'intensité maximale (I_{max}) soit le maximum le plus proche du bord du motif considéré,
- l'intensité minimale (I_{min}) soit le minimum d'intensité le plus proche du bord,
- la pente (Slope), toujours positive, est évaluée au seuil de référence dans la résine,
- la courbure (Factor), est la courbure du profil de l'image aérienne et n'est pas le résultat du calcul de la dérivée seconde de l'image aérienne (la méthode de calcul est la propriété de Mentor Graphics).

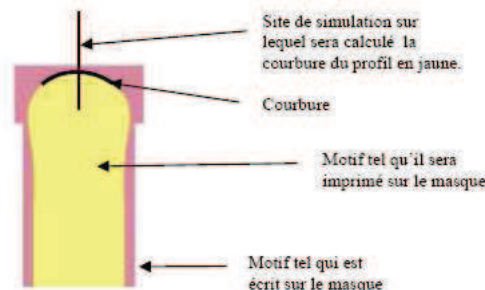


FIGURE 1.27 – Schéma illustrant la courbure de l'image aérienne au point de simulation.

Le seuil de référence est une constante définie pour l'extraction des paramètres optiques lors de la génération des modèles à seuil variable. Cette constante est calibrée à partir de données empiriques. D'après la définition de la pente, plus le seuil de référence se rapproche d'un minimum ou d'un maximum de l'image aérienne et plus la pente est faible. Concernant la courbure, il est à préciser qu'elle est évaluée à partir de trois points tangents au contour de l'image extraits au seuil de référence le long

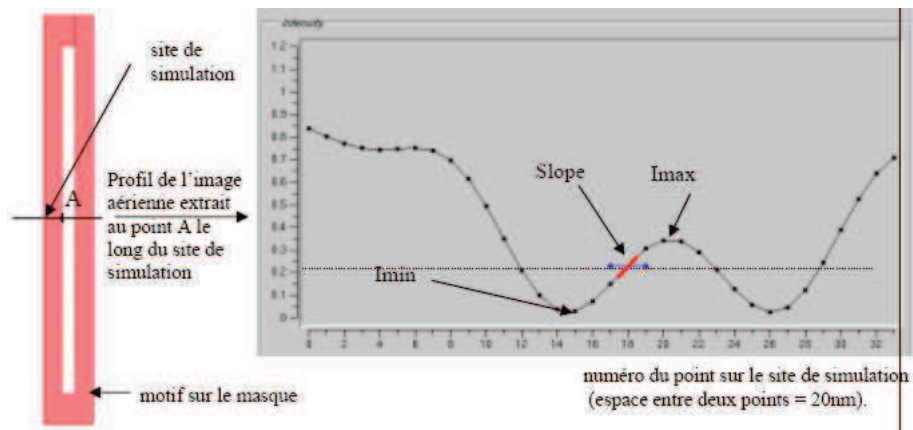


FIGURE 1.28 – Extraction des paramètres optiques le long d'un site de simulation perpendiculaire au bord d'un motif au point A.

du site de simulation (cf. Fig. 1.29, points repérés en blanc). A titre d'exemple, la valeur de la courbure extraite à partir du motif de la figure 1.29(a) est négative (elle vaut -3.2). Celle du motif de la figure 1.29(b) est positive (elle vaut +4.5). Ainsi les courbures négatives apparaissent autour des coins concaves et les courbures positives à proximité des coins convexes. Pour les motifs de type ligne/espace, la courbure est nulle au milieu des lignes.

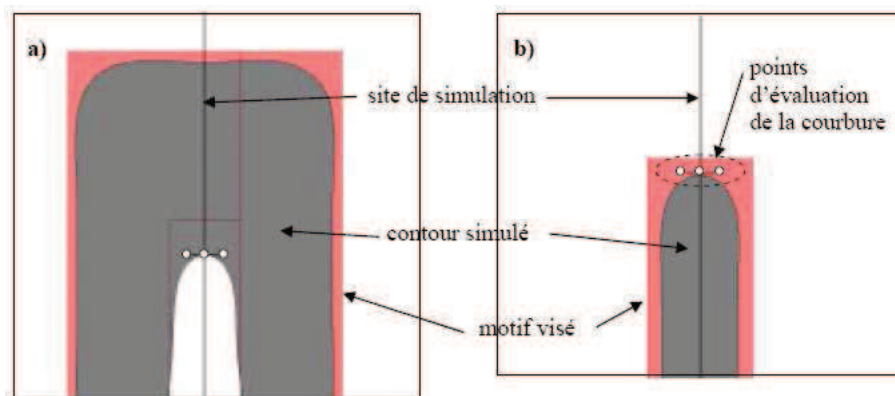


FIGURE 1.29 – exemples de courbure négative (a) et positive (b).

Les modèles résine simplifiés sont construits à partir de ces paramètres. Le modèle VTR est composé de 2 paramètres optiques seulement : I_{max} et $Slope$. Ce choix a été déterminé par analogie avec la modélisation du développement dans la résine par T. A. Brunner, pour une dose donnée, à partir de la pente de l'image aérienne et de l'intensité maximale. Puis il a été étendu à tous les paramètres optiques. Les formes des fonctions polynomiales décrivant le modèle à seuil variable sont multiples : com-

binaison linéaire des paramètres, combinaison linéaire des paramètres croisés ou élevés au carré... La fonction qui décrit le seuil variable est de la forme suivante :

$$T = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i C_i \quad (1.10)$$

où α_0 et $\{\alpha\}_{i=1,\dots,n}$ sont les coefficients résultant de la calibration et $\{C\}_{i=1,\dots,n}$ sont les combinaisons de paramètres utilisés (ex : $C_1 = I_{max}$, $C_2 = I_{max}^2$, $C_3 = I_{max} * I_{min}$,...). L'avantage de tels modèles est que l'information nécessaire est disponible à partir de l'image aérienne et ne fait pas intervenir d'autres simulations coûteuses en temps de calcul.

Diffusion et densité

D'autres fonctions peuvent être ajoutées pour simuler les effets de diffusion (qui ont lieu au moment du recuit après exposition) ou les effets de densité au niveau du masque. Des convolutions de l'image aérienne avec des fonctions noyaux de type gaussien ou de formes circulaires sont utilisées. Il est notamment à considérer, pour la modélisation des phénomènes de diffusion, une ou plusieurs convolutions avec des fonctions gaussiennes d'écart-types différents. La diffusion est alors prise en compte directement lors du calcul de l'intensité lumineuse pour être intégrée dans la matrice des TCC (voir équation 2.19). L'équation ci-dessous permet ainsi de ne pas augmenter le temps de calcul :

$$I(x, y) = \beta_0 AI(x, y) + \beta_1 (AI \otimes G_{\sigma_1})(x, y) + \dots + \beta_n (AI \otimes G_{\sigma_n})(x, y) \quad (1.11)$$

où AI représente l'image aérienne, $\{G_{\sigma_j}\}_{j=1,\dots,n}$ représente l'ensemble des fonctions gaussiennes d'écart-type σ_j et $\{\beta_j\}_{j=1,\dots,n}$ est l'ensemble des coefficients résultants de la calibration.

Le contour peut alors être extrait soit à l'aide d'un modèle à seuil constant, soit à l'aide d'un modèle à seuil variable. La notion de contour résine, ou d'image résine est alors utilisée.

Modélisation de la variation de dose

Pour finir, les variations de dose de la source peuvent être modélisées de deux façons : soit en faisant varier la position du seuil d'impression de la résine, soit en faisant varier l'intensité de l'image aérienne de la déviation enregistrée sur le scanner. Les outils d'OPC utilisent la seconde approche. En effet, lorsqu'une variation de dose de +5% par rapport à la dose nominale est enregistrée sur le scanner, l'intensité est multipliée par 1.05. Si la variation est de -5%, alors le coefficient multiplicateur est de 0.95.

1.5 l'OPC : optical proximity correction

Comme vu sur le graphique 1.7 et approfondi par la suite dans la section 2.1, seule une petite partie des ordres diffractés est captée par la pupille (en général, l'ordre 0 et les ordres ± 1). L'image de la structure est reconstituée à partir de cet ensemble restreint de fréquences. Les parties des structures possédant des fréquences élevées dans le domaine de Fourier sont ainsi mal résolues. L'optique de Fourier permet ainsi de prévoir quels motifs vont avoir du mal à se résoudre, puisque si les ordres élevés ne réussissent pas à être capté par la pupille, alors toutes les transitions rapides ainsi que les motifs agressifs vont avoir du mal à se résoudre. Ainsi, les principaux effets à corriger sont le retrait des bouts de ligne, la perte de résolution aux coins, et la non linéarité entre la largeur des lignes sur le masque et celle obtenue sur la plaquette observée, notamment lorsque le pas de réseau varie pour des lignes de même largeur sur le masque (cf. figure 1.31(a)). La technique appelée OPC (de l'anglais Optical Proximity Correction) est mise en œuvre pour compenser ces effets indésirables.

Plusieurs types de correction existent. Le premier, le plus simple et le plus ancien, est l'OPC dit "rule-based", basé sur des règles géométriques. Ce dernier consiste à ajouter ou à retirer artificiellement de la matière sur le masque afin de prévoir et de compenser la perte de résolution au moment de la formation de l'image. Ces règles sont généralement fixées pour des motifs simples, et les valeurs qui les régissent sont fixées de manière empirique. Plusieurs exemples sont représentés sur la figure 1.30(b), avec notamment l'ajout de matière dans les coins (appelé Serifs) ainsi qu'en bout de ligne (appelé Hammer Head), le retrait de matière dans les angles concaves... Des lignes de matières, appelé motifs iffractant non résolues ou SBAR de l'anglais scattering bar, sont également ajoutées de façon à reproduire localement un réseau de ligne, plus facile à imprimer qu'une ligne isolée, cependant leur taille n'est pas suffisante pour qu'elles s'impriment sur la résine.

Dans le second cas, des modèles calibrés sont utilisés à partir de données expérimentales [37][38]. Ces modèles reproduisent l'impression dans la résine à partir d'un modèle optique et d'un modèle résine (cf. partie 1.4). Le traitement par modèle est un processus itératif au cours duquel la position des bords des motifs est ajustée en fonction des résultats de la simulation (figure 1.31). Ainsi, le design est segmenté, et chaque partie de ce dernier est déplacé à chaque itération. Le mouvement de ces bords est réalisé pour compenser la différence entre le contour résine et le design souhaité. Une nouvelle image du masque est alors obtenue, différente du design souhaité. C'est cette image du masque qui sera reproduite sur le masque et exposée lors du procédé de lithographie. Il est à noter que généralement les formes obtenues avec un OPC rule based et un OPC model based sont similaires, mais que l'OPC model based propose un meilleur réglage des dimensions de l'OPC, permettant ainsi d'obtenir de meilleurs résultats.

Lors de ce calcul, seule la condition nominale est calculée et un tel OPC ne permet pas d'améliorer le procédé de fabrication d'un design. Afin de palier ce manque, un OPC model-based prenant en compte différentes valeurs de défocus et de variation

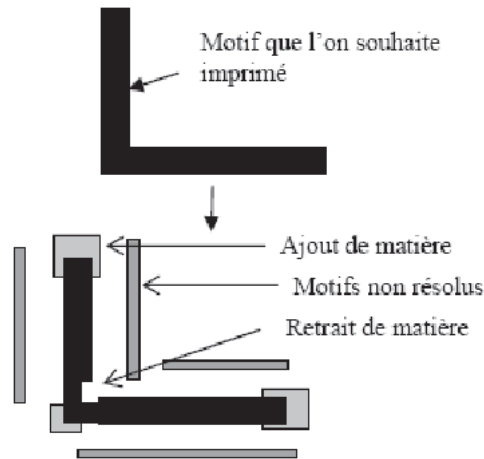


FIGURE 1.30 – a) Variation de la largeur imprimée aux conditions nominales en fonction du pas de réseau pour des lignes de 80nm sur le masque. b) Modification géométrique de la forme d'une structure pour compenser les effets de proximité.

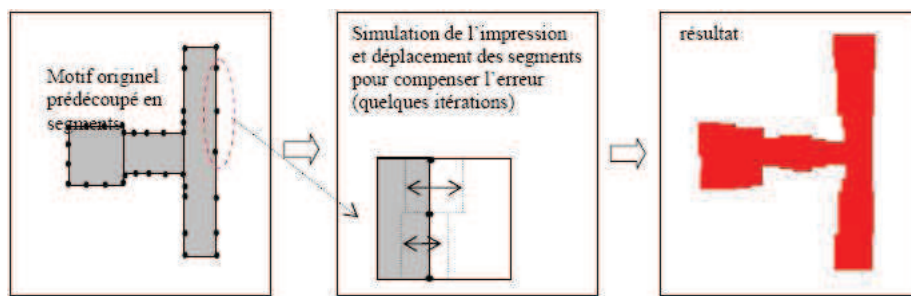


FIGURE 1.31 – Illustration du principe de l'OPC par modèle calibré, dit model based OPC

de doses prédéfinies et pondérées est utilisé. Ce nouvel OPC est appelé OPC process-window.

Chacun de ces déplacements, qu'il dérive d'un OPC rule-based, model-based ou process-window est géré par des logiciels spécifiques d'OPC, tel que les logiciels Calibre de Mentor Graphics ou Tachyon de Brion Technology. Dans ce cas, les simulations sont liées aux déplacements via des tables reliant chaque déplacement d'un bord à la différence entre le design dont il provient et l'image aérienne ou résine. Ces tables sont définies par les ingénieurs en charge des différentes technologies en fonction de la structure à laquelle les bords sont associés. En production et en développement, lors de la définition du programme dédié à l'OPC en question, elles sont codées, soit en lua pour le logiciel Tachyon, soit en SVRF pour le logiciel Calibre. Lors d'un OPC model-based, il est facile de prévoir le mouvement d'un bord spéci-

fique, ce dernier étant réalisé de façon à décaler l'image aérienne vers le design. Le bord associé se décalera donc dans le même sens. Par exemple, si l'image aérienne est à l'intérieur du design, le bord associé va se décaler vers l'extérieur, de telle sorte que la nouvelle image aérienne après itération est décalée dans le bon sens. La valeur du déplacement est en général inférieure à l'écart entre l'image aérienne et le design. Dans un OPC process window, les contours associés à plusieurs conditions d'illumination sont pris en compte. Avec cet OPC, le déplacement est défini par une fonction dépendant des écarts entre le design et les contours des images aériennes réalisées à différentes conditions. Dans l'exemple représenté sur la figure 1.32, les contours en défocus sont situés à l'intérieur du design, tandis que le contour à meilleur focus est situé à l'extérieur. Contrairement à l'OPC model-based non process window, ces contours placés à l'intérieur sont pris en compte, et pour les corriger, il est possible d'agrandir le motif sur le résultat post-OPC, malgré le fait que cela dégrade encore plus le contour réalisé aux meilleures conditions.

Il est enfin possible de réaliser un OPC à partir des simples résultats de simulation. En effet, ces résultats de simulations peuvent être extraits des logiciels tels que Panoramic sous forme de vecteur. Il est alors possible de travailler dessus avec n'importe quel langage de programmation. Dans le cadre de cette thèse, des programmes d'OPC rédigés en langage Matlab ont été réalisés afin de se familiariser avec l'outil d'OPC. Cependant, les résultats obtenus n'apportant pas un réel gain par rapport aux logiciels fournis par les compagnies spécialisés, ces programmes d'OPC ne seront pas traités par la suite.

La figure 1.33 permet d'illustrer l'utilité de l'utilisation d'un OPC. En effet, il est possible de constater que l'utilisation d'un OPC (en haut à droite) permet d'obtenir des résultats bien meilleurs (en bas à droite). A l'inverse, sur la gauche du schéma, aucun OPC n'est utilisé et les résultats en mesure sur la plaquette ne sont pas satisfaisant.

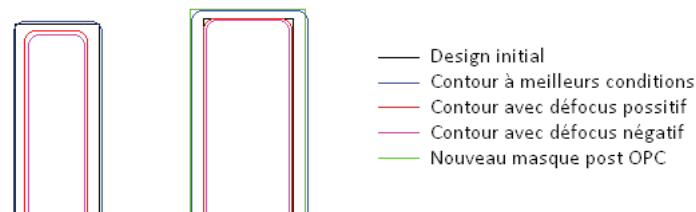


FIGURE 1.32 – Lors d'un "process window OPC", les conditions dégradées sont également étudiées afin de savoir comment on déplace le bord.

1.5.1 Les contraintes du masque

Lors des déplacements des motifs présents sur le masque, il peut arriver que différents motifs posent problème. Il est en effet possible que ces déplacements amènent

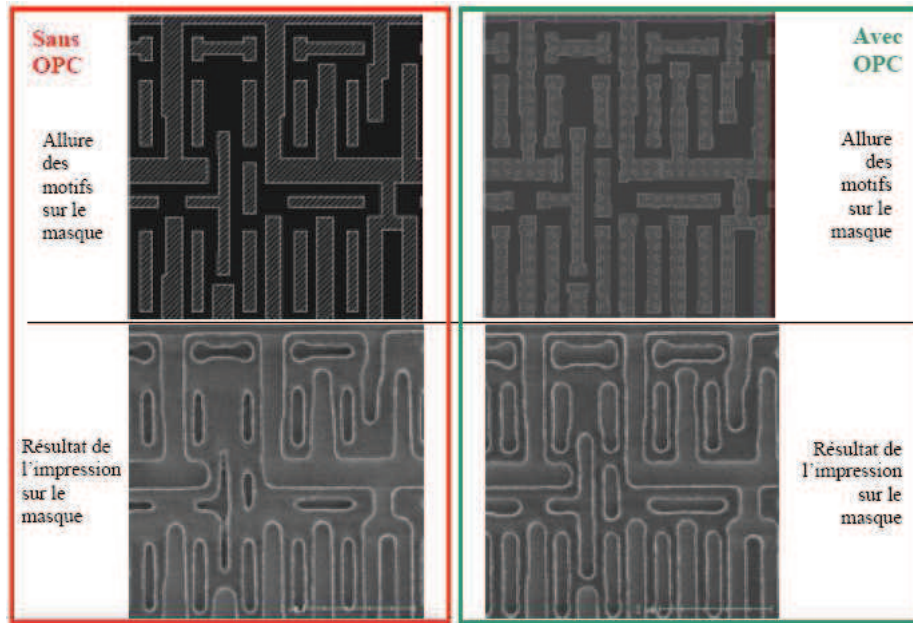


FIGURE 1.33 – Comparaison entre les motifs d'un niveau métal 1 de technologie 65nm, présents sur un masque ayant ou non subi un traitement par OPC, et le résultat obtenu après développement sur la plaquette. On voit clairement la nécessité de l'OPC ici.

ces motifs à entrer en interaction, ou à être techniquement irréalisables par les fabricants de masque. Pour empêcher ces effets indésirables, des contraintes sont appliquées à ces déplacements lors des itérations. Ces contraintes sont appelées MRC de l'anglais "mask rules check". Ces MRC sont fixées pour chaque technologie et prennent en compte de nombreux aspects différents tels que la taille minimum des segments, l'aire minimum d'un motif, la distance minimum entre deux motifs, la taille minimum d'une ligne etc... Ces règles sont prises en compte directement par les logiciels d'OPC lors des déplacements de bords, mais doivent cependant être renseignées lors de la définition du programme d'OPC.

1.5.2 L'OPC inversé

Une autre façon de procéder afin d'obtenir la forme du masque est de procéder à l'envers. En effet, dans l'approche classique de l'OPC, la source et le masque sont donnés et il en résulte une image de ce dernier sur le wafer. Cette technique appelée OPC inversé [39] présuppose qu'en partant d'un masque possédant une forme similaire à l'image souhaitée sur le wafer, alors l'image sur le wafer sera suffisamment acceptable pour pouvoir travailler dessus. C'est un point de départ du processus itératif qui en découle où l'amélioration de l'image aérienne est le but premier.

Toutefois, puisque l'image du wafer représente le résultat souhaité, il est possible de

la figer dans les calculs. En effet, si dans le principe de lithographie, l'inconnue n'est plus l'image wafer qui est donc calculé, mais le masque, le problème est également résoluble. Ainsi, en fixant l'image du wafer sur l'image finale souhaitée, et en laissant le masque entièrement libre, il est possible par le calcul de remonter à l'image du masque. Il est possible de faire l'analogie $Source + Masque = Wafer$ telle qu'au lieu d'avoir la source et le masque connus, cette fois-ci la source et wafer sont connus. Il est d'ailleurs possible de considérer que ni la source ni le masque ne sont connus et de remonter à la forme de la source et du masque par lithographie inversée.

Cependant, le calcul est un calcul bien plus complexe qui ne sera pas étudié dans le cadre de cette thèse, et ce malgré le fait que les logiciels d'optimisation source masque industriels se basent sur le principe de lithographie inversée pour remonter à la fois à la forme de la source et à la forme du masque.

Au même titre qu'une image aérienne d'intensité est obtenue sur le wafer à l'aide d'une simulation classique, une image aérienne du masque en intensité est alors obtenue après le calcul. De nombreux problèmes se posent ensuite pour transformer cette image d'intensité en carte binaire, et des modèles similaires à ceux décrits pour la lithographie classique peuvent être utilisés. A l'heure actuelle, la technologie étant une technologie très jeune, le modèle à seuil constant est le plus couramment utilisé, et entraîne de nombreux problèmes de précision et de forme de motifs aggraves.

L'utilisation d'un tel principe donne des masques parfois complètement décorré de la forme finale sur le wafer et il devient alors compliqué de garder un bon contrôle de la forme du masque, notamment lors de l'apparition de problèmes, puisqu'un problème sur le wafer n'est pas directement lié à un motif identique sur le masque.

1.6 Autres techniques utilisées dans la lithographie optique

La lithographie optique est aujourd'hui une technologie mature, utilisée depuis de nombreuses années par le monde de l'industrie du semi-conducteur. De ce fait, elle possède un panel multiple de techniques, maîtrisées ou toujours à l'étude, utilisées couramment ou encore au banc d'essai. Plusieurs de ces techniques, bien que non utilisées lors de cette étude, sont des techniques importantes du développement de la lithographie et tendent à être de plus en plus utilisées dans l'avenir. Cette partie va ainsi rapidement présenter les deux prochaines avancées technologiques majeures attendues pour les prochaines années, qui ne sont d'ailleurs pas incompatibles avec l'optimisation de la source.

1.6.1 La double exposition

La diminution du facteur k_1 dégrade de plus en plus la latitude du procédé, à tel point que des techniques de multi-exposition deviennent nécessaires pour les technologies de plus en plus agressives. La multi-exposition consiste à exposer un même wafer à plusieurs reprises, permettant ainsi la résolution de motifs impossibles à fabriquer en simple exposition, et ce au détriment de la rapidité de fabrication du motif. Il existe plusieurs méthodes de multi-exposition, mais aucune de ces techniques n'ayant été utilisé lors de cette étude, elles ne seront pas abordées en détails. La figure 1.34 illustre rapidement un exemple de double exposition parmi plusieurs.



FIGURE 1.34 – La technique de double exposition permet de créer un réseau de ligne jusqu'à deux fois plus dense qu'en simple exposition, en n'imprimant qu'une ligne sur deux avec chaque exposition.

La technique de double exposition n'a dépassé le stade expérimental que depuis peu. Ce procédé est le concurrent direct de la technique d'optimisation des sources optiques, sujet principal de cette étude. Cette mise en œuvre permet de résoudre les pas de réseau inférieur à 71nm, nécessaire dans la technologie C020 metal1. Elle est donc aujourd'hui quasiment mature mais son coût de réalisation important fait que pour tous les autres niveaux de la technologie C020, la technique d'optimisation de source lui est préférée. Il est possible cependant d'utiliser les deux techniques en parallèle, mais le gain apporté par la technique de double exposition est suffisamment important pour pouvoir se permettre dans un premier temps de négliger l'optimisa-

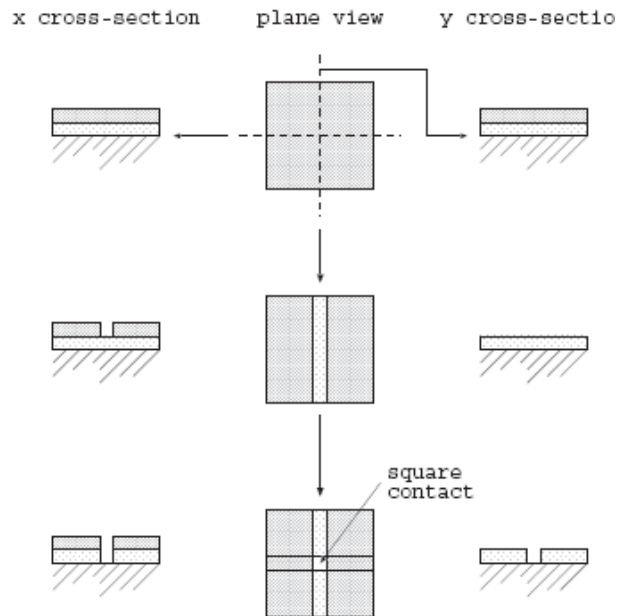


FIGURE 1.35 – On peut obtenir un design aux formes carrées en exposant de façon perpendiculaire deux lignes, créant ainsi une zone d'intersection carrée.

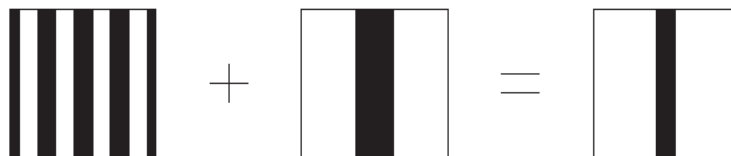


FIGURE 1.36 – On peut obtenir des lignes isolés, plus difficile à obtenir, en imprimant un réseau de ligne et en éliminant les lignes superflues.

tion de la source. Cela ne sera pas toujours le cas, et la technique d'optimisation des sources ne sera donc pas remplacée par la double impression sur le long terme.

1.6.2 l'Extrême UV

Les motifs imprimés aujourd'hui en lithographie sont de taille de plus en plus petite, et aujourd'hui des réseaux de lignes de 80nm sont imprimés régulièrement. Cette taille est largement inférieure à la longueur d'onde utilisé, et il devient donc de plus en plus difficile, voire impossible, de réduire la taille de ces motifs. En effet, la limite théorique de résolution pour une longueur d'onde de 193nm et une ouverture numérique de 1.35 est de 71nm. (cf. partie 2.1).

Afin de continuer la miniaturisation des circuits électriques, l'industrie se dirige au-

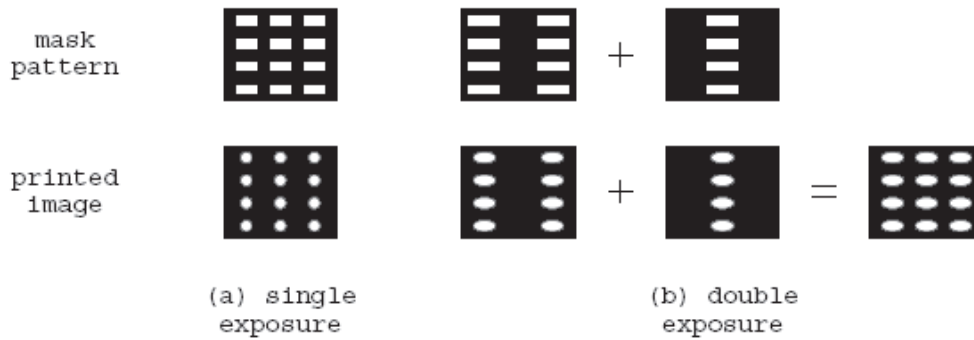


FIGURE 1.37 – La double exposition permet de compenser la réduction de la taille des lignes sans craindre que les contours ne se rejoignent.

jourd'hui vers un changement de longueur d'onde pour prendre une longueur d'onde plus petite. Ce genre de changement n'est pas nouveau puisqu'il à déjà été effectué au sein de l'industrie à de nombreuses reprises, la dernière en date étant le passage d'une longueur d'onde de 248nm à une longueur d'onde de 193nm pour les technologies inférieures à 65nm (règle non fixée dépendant des compagnies, des niveaux etc...).

Cette fois-ci cependant, la technologie va effectuer un bond en avant bien plus grand qu'à l'accoutumée puisque la prochaine longueur d'onde visée est située dans les ultraviolets extrêmes, avec une longueur d'onde de 13.5nm. Un tel changement pose cependant de très nombreux problèmes puisque toutes les techniques maîtrisées jusqu'à présent doivent être repensées. En effet, les masques actuels n'étant plus transparent à cette longueur d'onde, un système de masque en miroir doit être mis en place, apportant son lot de difficultés techniques. De même, les résines doivent être changées, le système optique également, ou la source optique, problème majeur à l'heure actuelle puisque les puissances délivrées par les sources actuelles ne sont pas suffisantes pour satisfaire des besoins de productions.

Cette technique dites EUV n'est pas incompatible avec l'optimisation de la source puisque les scanners extrême UV qui commencent aujourd'hui à arriver à maturité possèdent déjà des modules permettant de générer des sources complexes. Cette étude réalisée sur une technologie 193nm est donc parfaitement extrapolable pour l'extrême UV.

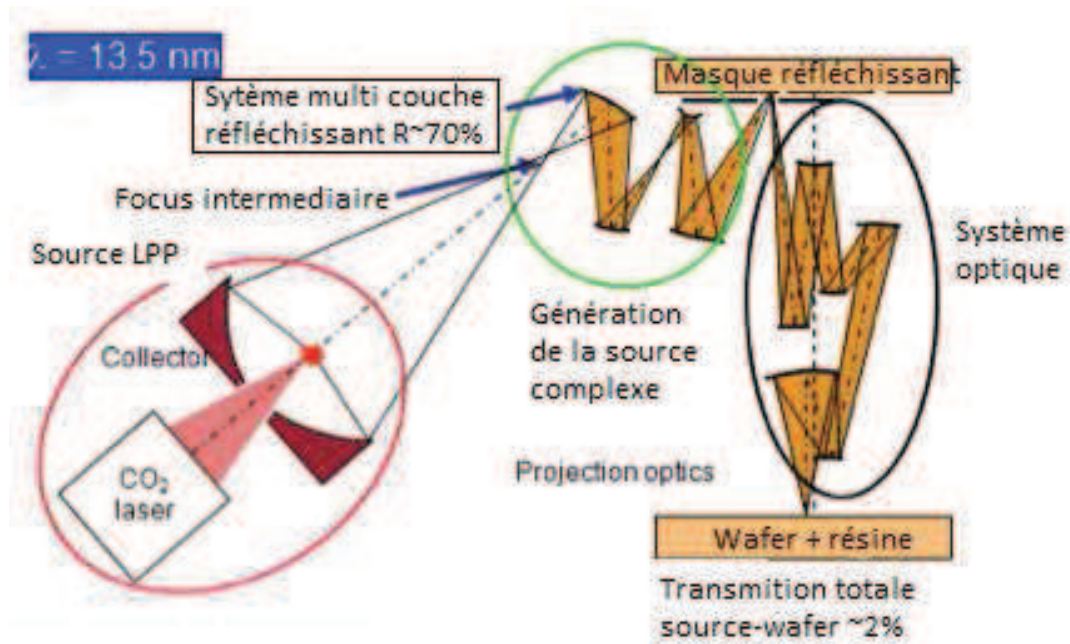


FIGURE 1.38 – Illustration de la technique de lithographie par extrême UV.

Chapitre 2

Phénomène de diffraction et source optique

Le précédent chapitre de cette étude a permis d'obtenir une vue globale du contexte et des notions nécessaires à la bonne compréhension de cette thèse. Dès lors que ces notions sont comprises et assimilées, il est possible d'entamer la réflexion sur la source utilisée lors de l'étape de lithographie optique tout en se servant de ces connaissances.

La technique étudiée durant cette thèse est la technique dite SMO, ou "Source Masque Optimization", appelée en français méthode de cooptimisation de la source et du masque, et sera étudiée plus avant dans le chapitre III. La notion de cooptimisation est cependant une technique poussée qui met en œuvre une modification de la source comme du masque. Si la nécessité de l'optimisation du masque afin d'assister l'impression des motifs souhaités est largement rependue (voir partie 1.5), la partie optimisation de la source est quant à elle une nouveauté dans l'industrie. En effet, jusqu'à présent, les sources optiques utilisées étaient des sources simples, choisies pour des raisons historiques et peu de réflexions étaient menées sur l'utilisation de ces dernières.

Dans ce second chapitre nous allons donc nous attarder à étudier et à démontrer l'intérêt de modifier la forme de la source optique en lithographie. L'aspect théorique de la modification de la source de lithographie sera donc ici étudié afin de démontrer l'intérêt de la méthode. De plus, les notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement de la méthode seront abordées.

2.1 Formation des images et résolution

Dans l'industrie, les sources utilisées en lithographie sont des sources hors-axe depuis quelques années déjà. C'est à dire que les sources ponctuelles ne sont pas situées sur l'axe optique du système. Ces sources sont utilisées avec une compréhension limitée du problème, puisqu'elles sont généralement utilisées pour des raisons historiques ou de partenariat économique et non pour de réelles raisons scientifiques.

Afin de mieux comprendre l'intérêt de l'utilisation de la source hors-axe, une première partie du travail réalisé a consisté à comprendre et démontrer l'intérêt de l'utilisation d'une source hors-axe. Pour ce faire, il est possible de se baser dans un premier temps sur la physique de l'électromagnétisme et sur les lois de la diffraction. Afin d'étudier la résolution théorique de la lithographie optique, le critère de Reighley a été mis en place, comme vu dans l'équation 1.1.

$$CD = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (2.1)$$

Avec k_1 le critère de Reighley, λ la longueur d'onde et NA l'ouverture numérique. Dans un premier temps, le cas simple d'un réseau infini éclairé par une onde incidente cohérente unidirectionnelle sera étudié. L'application du principe de Huygens-Fresnel sur un réseau infini éclairé par une source ponctuelle, monochromatique, cohérente et sous incidence normale permet de prévoir que ce dernier diffracte la lumière en une figure de diffraction simple. Cette dernière est composée de la somme des raies de diffraction induit par le réseau représenté sur la figure 2.1, avec l' la taille des fentes du réseau, p' le pas du réseau sur le masque, α l'angle de diffraction du faisceau schématisé, et Δ la différence de marche entre les rayons cohérents qui passent par deux fentes voisines.

2.1.

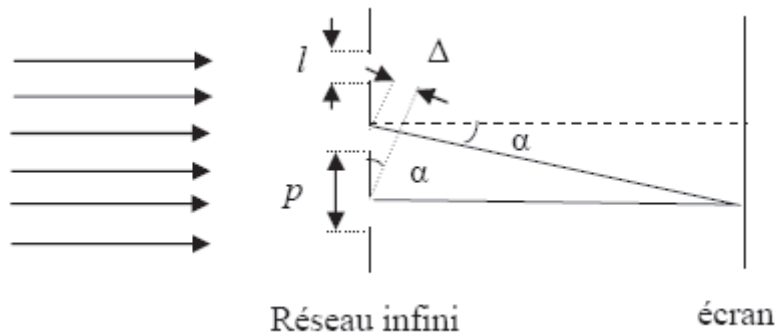


FIGURE 2.1 – Apparition du phénomène de diffraction par un réseau infini avec une onde plane incidente cohérente. Les rayons diffractés forment un angle α avec l'axe optique qui dépend du pas p' du réseau.

Pour avoir une interférence constructive entre les deux rayons, et donc à fortiori entre tous les rayons qui sortent de toutes les fentes, il est nécessaire d'avoir une différence de marche entre deux rayons de $\Delta = m \cdot \frac{\lambda}{n}$ avec n l'indice du milieu et m un entier relatif. La formule suivante définit donc les raies de diffractions d'un réseau infini :

$$\sin \alpha = m \frac{\lambda}{p' \cdot n} \quad (2.2)$$

Le fait de considérer une source lumineuse cohérente, monochromatique et ponctuelle permet de simplifier le problème.

En conséquence de l'utilisation du système d'illumination de Köhler (figure 1.7), la lumière incidente éclaire le masque de façon uniforme. En raison des propriétés de la transformée de Fourier appliquée aux systèmes optiques, l'énergie transmise par un point $O(x', y')$ placé dans le plan du masque (x', y') sur le plan de la pupille (f, g) forme une distribution proportionnelle au spectre du masque. Par application du principe de la diffraction dans l'optique de Fourier, les fréquences spatiales basses correspondant à des valeurs de m faible, se retrouveront les plus proches du centre de la pupille, alors que les hautes fréquences spatiales correspondant aux grands ordres de diffraction tendent à s'éloigner du centre. Les fréquences trop importantes sont alors filtrées par le diaphragme de la pupille qui joue un rôle de filtre passe-bas. Les raies captées par la pupille se recombinaient alors sur le plan image au niveau du wafer pour former une image déformée du masque liée à ce filtre passe-bas.

Soit $O(x', y')$ la fonction définissant le masque. La transformée de Fourier correspondante sera notée $\tilde{O}(f, g)$, de sorte que f et g soient les fréquences spatiales du plan de Fourier associées aux motifs sur le plan du masque (x', y') . En effectuant la transformée de Fourier inverse de la fonction $\tilde{O}(f, g)$ par la lentille de sortie, il devient alors possible de calculer la valeur $E(x, y)$ du champ au niveau du plan image (x, y) . De plus, seuls les rayons captés par la pupille $\tilde{P}(f, g)$ sont transmis. Il est donc possible de calculer $E(x, y)$ comme étant la transformée inverse de la convolution de ces deux fonctions. Ainsi :

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{P}(f, g) \tilde{O}(f, g) e^{i2\pi[f x + g y]} df dg. \quad (2.3)$$

La pupille $\tilde{P}(f, g)$ est une fonction porte qui ne capte que certaines raies de diffraction.

Le calcul de cette fonction porte peut s'effectuer en étudiant la diffraction qu'émettrait l'image du masque sur le wafer si la lumière parcourait le chemin inverse. En effet, ce réseau du wafer a un pas $p = G.p'$ une fréquence $\nu = \frac{1}{p} = \frac{1}{G}.\nu'$ avec $G = \frac{f_2}{f_3}$ tels que G soit le facteur de grandissement du système et f_2 et f_3 les distances focales des lentilles 2 et 3 (cf. figure 1.7). Il en découle comme vu précédemment :

$$\sin \alpha = m. \frac{\lambda}{p'.n}$$

Seules les raies avec un angle $\alpha \leq \theta$ sont alors captées par la pupille ; avec θ l'ouverture maximale définie par $n.\sin \theta = NA$ où NA est l'ouverture numérique. Cela donne :

$$\sin \alpha = m. \frac{\lambda}{n}. \nu' \leq \frac{NA}{n}$$

Il devient alors possible de définir la fonction porte comme suit :

$$\tilde{P} = \begin{cases} 1 & \text{si } \sqrt{f^2 + g^2} = \nu' \leq \frac{NA}{\lambda}. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.4)$$

L'intensité étant l'expression de l'énergie au carré, alors :

$$I(x, y) = \left| \int \int_{v' \leq \frac{f_2}{f_3} \frac{NA}{\lambda}} \tilde{O}(f, g) e^{i2\pi[f x + g y]} df dg \right|^2. \quad (2.5)$$

Pour plus de simplicité, un changement de variable peut être effectué, tel que $x = \hat{x} \cdot \frac{f_3}{f_2} \frac{\lambda}{NA}$ et $f = \hat{f} \cdot \frac{f_2}{f_3} \frac{NA}{\lambda}$:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I\left(\hat{x} \cdot \frac{f_3}{f_2} \frac{\lambda}{NA}, \hat{y} \cdot \frac{f_3}{f_2} \frac{\lambda}{NA}\right) = \hat{I}(\hat{x}, \hat{y}) \\ &= \left(\frac{f_2}{f_3} \frac{NA}{\lambda}\right)^4 \left| \int \int_{\hat{v} \leq 1} \tilde{O}(\hat{f} \frac{f_2}{f_3} \frac{NA}{\lambda}, \hat{h} \frac{f_2}{f_3} \frac{NA}{\lambda}) e^{i2\pi[\hat{f} \hat{x} + \hat{g} \hat{y}]} d\hat{f} d\hat{g} \right|^2 \\ &= \left| \int \int_{\hat{v} \leq 1} \tilde{\hat{O}}(\hat{f}, \hat{h}) e^{i2\pi[\hat{f} \hat{x} + \hat{g} \hat{y}]} d\hat{f} d\hat{g} \right|^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Pour un motif simple de réseau unidirectionnel il est possible d'effectuer le changement de variable tel que $p' = \hat{p} \cdot \frac{f_3}{f_2} \frac{\lambda}{NA}$ afin d'obtenir :

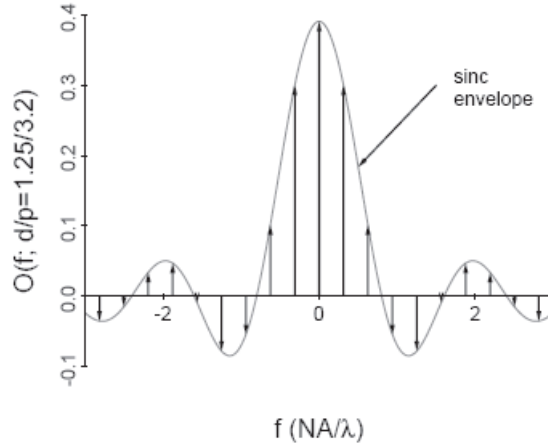
$$\hat{O}(\hat{x}, \hat{y}) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\hat{x} - m\hat{p}| \leq \frac{\hat{p}}{2}, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad m \in \mathbb{Z} \quad (2.7)$$

Soit $\tilde{\hat{O}}(\hat{f})$ le spectre de $\hat{O}(\hat{x})$, transformée de Fourier de ce dernier. Il s'exprime alors :

$$\begin{aligned} \tilde{\hat{O}}(\hat{f}) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{\hat{d}}{2} + m\hat{p}}^{+\frac{\hat{d}}{2} + m\hat{p}} e^{i2\pi\hat{f}\hat{x}} d\hat{x}, \quad m \in \mathbb{Z} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(\pi\hat{f}\hat{d})}{\pi\hat{f}} e^{i2\pi\hat{f}m\hat{p}} \\ &= \frac{\hat{d}}{\hat{p}} \cdot \text{sinc}(\hat{f}\hat{d}) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(\hat{f} - \frac{m}{\hat{p}}). \end{aligned} \quad (2.8)$$

avec $\delta(\hat{f} - \frac{m}{\hat{p}})$ un peigne de Dirac de pas $\frac{1}{\hat{p}}$. Peut ainsi être tracé le spectre obtenu dans le domaine de Fourier sur la figure 2.2.

En remplaçant l'expression de $\tilde{\hat{O}}(\hat{f})$ dans l'équation 2.6 par celle obtenue dans l'équa-


 FIGURE 2.2 – Image du spectre de Fourier pour $\hat{d} = 1.25$ et $\hat{p} = 3.2$

tion 2.8, est obtenu le résultat suivant :

$$\begin{aligned} \hat{I}(\hat{x}) &= \left| \int_{-1}^{+1} \frac{\hat{d}}{\hat{p}} \cdot \text{sinc}(\hat{f}\hat{d}) e^{i2\pi\hat{f}\hat{x}} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\hat{f} - \frac{m}{\hat{p}}\right) d\hat{f} \right|^2 \\ &= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left| \sum_{m=-m_0}^{+m_0} \text{sinc}\left(\frac{m\hat{d}}{\hat{p}}\right) e^{\frac{i2\pi m\hat{x}}{\hat{p}}} \right|^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left| 1 - \sum_{m=1}^{+m_0} 2 \text{sinc}\left(\frac{m\hat{d}}{\hat{p}}\right) \cos\left(\frac{2\pi m\hat{x}}{\hat{p}}\right) \right|^2 \quad (2.10)$$

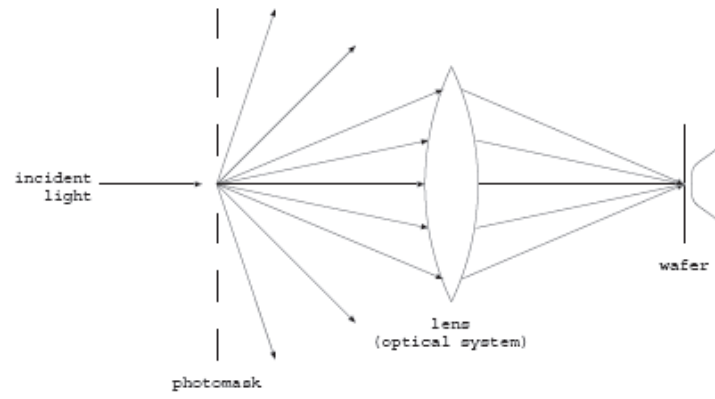
Avec $m_0 \in \mathbb{Z}^+$ la restriction induite par les limites de l'intégrale $\int_{-1}^{+1} d\hat{f}$, définie comme suit :

$$m_0 \leq \hat{p} < m_0 + 1, \quad m_0 \in \mathbb{Z}^+ \quad (2.11)$$

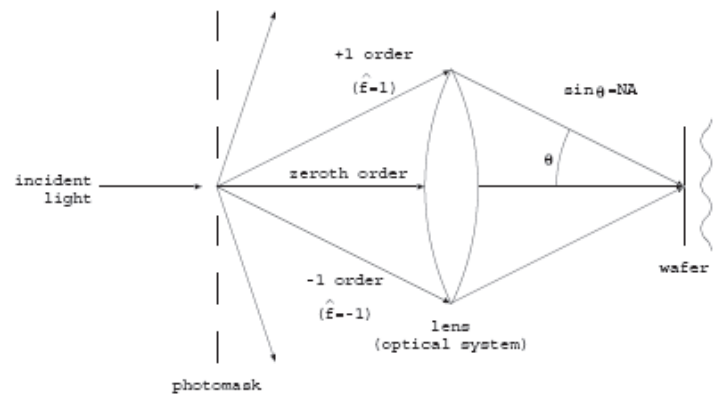
Il est possible d'en déduire que si seul l'ordre zéro est capté par la pupille, l'image du masque sur le wafer est continue. Aucune impression n'est alors possible. Afin d'obtenir une image sur la résine, il devient nécessaire de capter au moins un second rayon de diffraction. Il existe donc un pitch du masque p' limite pour une illumination incidente normale cohérente et monochromatique et un pitch p lui correspondant sur le wafer, correspondant à $m_0 \neq 0$. La figure 2.3 illustre cette limite de résolution pour le cas où les ordres de diffractions distincts de l'ordre zéro ne sont plus captés.

$$\hat{I}(\hat{x}) = \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \quad \text{pour } \hat{p} < 1. \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \hat{p}_{min} &= 1 \\ p'_{min} &= \frac{1}{G} \frac{\lambda}{NA} \\ p_{min} &= \frac{\lambda}{NA} \end{aligned} \quad (2.13)$$



(a) $\hat{p} = 2.5$



(b) $\hat{p} = 1$

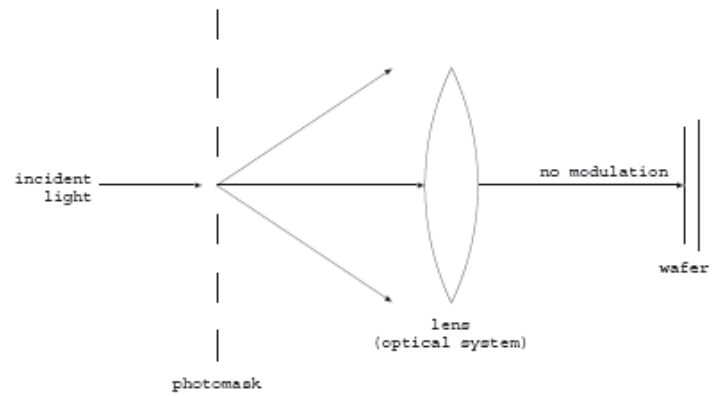


FIGURE 2.3 – Illustration de la limite de résolution

2.2 Représentation à deux dimensions

Les calculs précédents ont été simplifiés pour un motif à une dimension, cependant les ordres de diffraction peuvent être représentés sur le plan de la pupille comme figure 2.4

La fonction porte donnée par l'équation 2.4 définissant un cercle de rayon $\hat{r} = 1$, il est possible de représenter ce dernier sur le plan de la pupille dans l'espace des fréquences (\hat{f}, \hat{g}) , tel que sur la figure 2.4. Sur cette figure, le spectre de raies associé aux motifs du masques est représenté tel que défini dans l'équation 2.9.

Dans le cas où le motif du masque n'est plus un réseau à une dimension, mais est défini en deux dimensions, le spectre de chacun de ces réseaux est alors observé de façon indépendante sur le plan de la pupille tel qu'illustré sur le graphique 2.4.

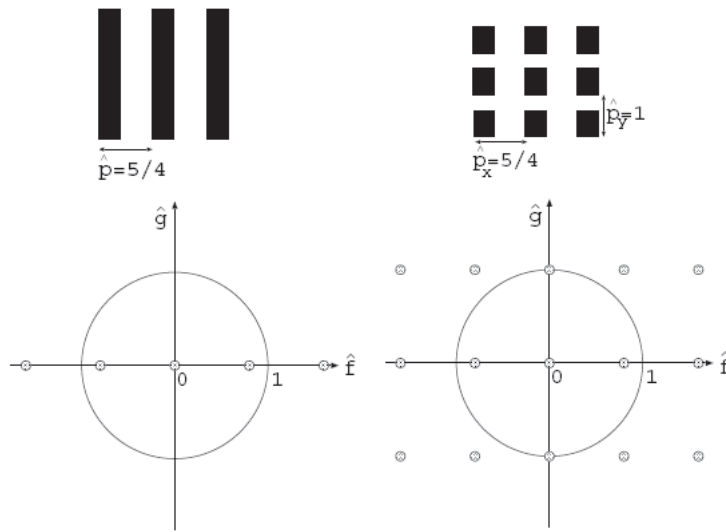


FIGURE 2.4 – Discretisation des fréquences pour : (a) masque unidimensionnel avec un pitch $\hat{p} = 5/4$ et (b) masque à deux dimension avec une période $\hat{p}_x = 5/4$ et $\hat{p}_y = 1$.

2.3 Illumination hors axe

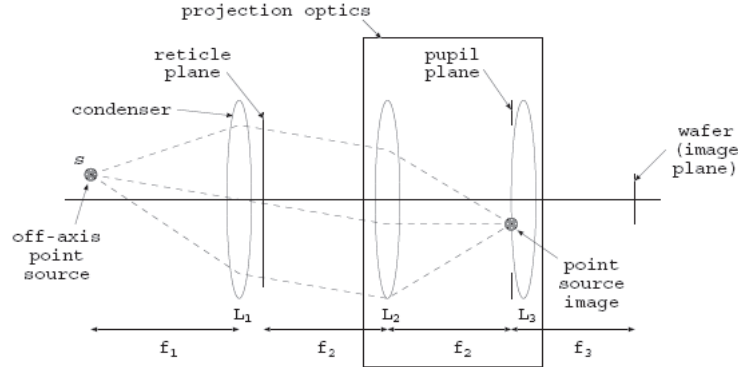


FIGURE 2.5 – Illustration du principe d'illumination hors-axe

En examinant l'image résultante créée par une source lumineuse située en dehors de l'axe optique, telle qu'illustrée sur la figure 2.5, où l'image de s est formée sur le plan de la pupille, il sera associé à la source s les coordonnées (\hat{f}_s, \hat{g}_s) correspondant aux coordonnées de l'image de s dans le plan de la pupille. Pour une source s quelconque, définie telle que $(\hat{f}_s, \hat{g}_s) = (0, 0)$, il est possible d'extrapoler le système optique pour que ce dernier reste invariant durant une translation. Ceci implique alors de définir le spectre créé par s par le shift de l'équation du spectre $\tilde{O}(\hat{f}, \hat{g})$ de la fonction du masque $\hat{O}(\hat{x}, \hat{y})$. L'équation suivante est alors obtenue :

$$\tilde{O}(\hat{f} - \hat{f}_s, \hat{g} - \hat{g}_s)$$

L'intensité résultante du point source s devient mathématiquement :

$$\hat{I}(\hat{x}, \hat{y}) = \left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{P}(\hat{f}, \hat{g}) \tilde{O}(\hat{f} - \hat{f}_s, \hat{g} - \hat{g}_s) e^{-i2\pi(\hat{f}\hat{x} + \hat{g}\hat{y})} d\hat{f} d\hat{g} \right|^2. \quad (2.14)$$

Un dispositif permettant d'illuminer le masque depuis plusieurs points, de telle sorte que la source ne soit plus ponctuelle mais une somme de sources ponctuelles, est représenté sur la figure 2.7(a). De même, un dispositif possédant une source étendue est schématisé sur la figure 2.7(b).

L'utilité d'une illumination hors-axe est ainsi illustrée aisément. Le principal intérêt d'éclairer le masque, non plus avec une source ponctuelle, mais avec une source étendue constituée de plusieurs faisceaux devient alors clairement visible. En effet, en utilisant une illumination hors-axe, des rayons de diffraction qui n'auraient pas pu être captés avec une illumination sur l'axe optique peuvent être captés. En considérant que les deux rayons sont parfaitement incohérents, l'intensité résultante sera calculée comme étant la somme des intensités résultantes de chacun des rayons in-

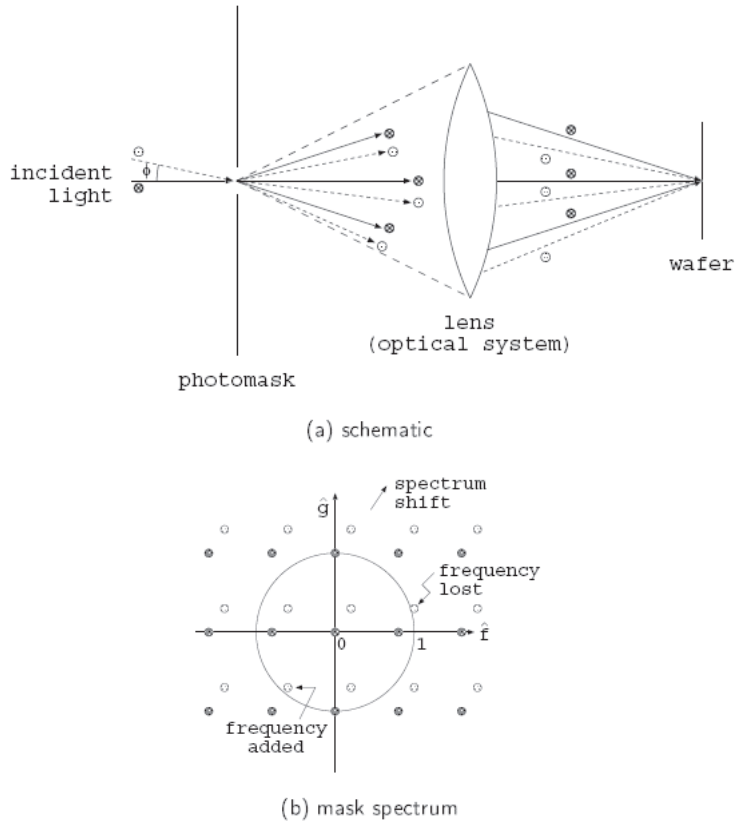


FIGURE 2.6 – Schéma et spectre 2D créés par deux faisceaux sur un masque de fréquence $\hat{p}_x = 5/4$ et $\hat{p}_y = 1$

dépendants. Situation traduite par l'équation :

$$\hat{I}(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{\sum_s a_s \hat{I}_s(\hat{x}, \hat{y})}{\sum_s a_s} \quad (2.15)$$

tel que a_s corresponde à l'intensité de la source s . La somme au dénominateur permet de normaliser l'intensité à 1 lorsque le motif représente une zone claire.

La notion de source effective peut alors être introduite, traduisant la représentation de l'image de la source dans le plan de la pupille, en faisant abstraction d'un quelconque motif du masque et donc du problème de diffraction. Par exemple, si la source est constituée de deux raies nommées $s = 1$ et $s = 2$, d'intensité relative $a_{s=1} = a_{s=2} = 1$ et positionnées tel que $(\hat{f}_{s=1}, \hat{g}_{s=1}) = (0, 0)$ et $(\hat{f}_{s=2}, \hat{g}_{s=2}) = (0.2, 0.3)$, la source effective est alors notée $\hat{J}(\hat{f}, \hat{g})$ comme représentée sur la figure 2.7(a) et définie comme

suit :

$$\begin{aligned}\tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) &= \frac{\sum_s a_s \delta(\hat{f} - \hat{f}_s, \hat{g} - \hat{g}_s)}{\sum_s a_s} \\ \tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) &= \frac{1}{2} [\delta(\hat{f}, \hat{g}) + \delta(\hat{f} - 0.2, \hat{g} - 0.3)]\end{aligned}\quad (2.16)$$

Où $\delta(\hat{f}, \hat{g})$ est le pic de Dirac correspondant aux valeurs de \hat{f} et \hat{g} données.

De même, si la source est une source étendue, circulaire, de rayon σ dans le plan (\hat{f}, \hat{g}) , le résultat représenté sur la figure 2.7(b) est :

$$\tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \text{circ}\left(\frac{\sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2}}{\sigma}\right) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sigma^2} & \text{si } \sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2} \leq \sigma \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.17)$$

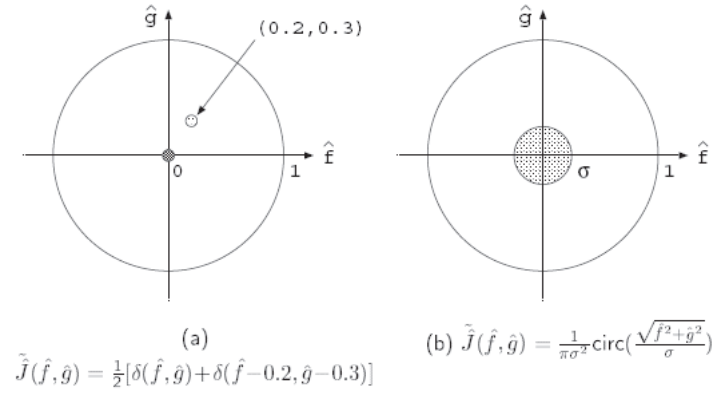


FIGURE 2.7 – Exemple de source effective

L'intensité résultante de l'interaction de deux raies lumineuses, situées en (\hat{f}_1, \hat{g}_1) et en (\hat{f}_2, \hat{g}_2) peut également être étudiée en remplaçant la somme de l'équation 2.15 par une intégrale et en l'injectant dans l'équation 2.16. L'intensité résultante obtenue devient :

$$\begin{aligned}\hat{I}(\hat{x}, \hat{y}) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) \tilde{P}(\hat{f} + \hat{f}_1, \hat{g} + \hat{g}_1) \tilde{P}^*(\hat{f} + \hat{f}_2, \hat{g} + \hat{g}_2) \tilde{O}(\hat{f}_1, \hat{g}_1) \\ &\quad \tilde{O}^*(\hat{f}_2, \hat{g}_2) e^{-i2\pi[(\hat{f}_1 - \hat{f}_2)\hat{x} + (\hat{g}_1 - \hat{g}_2)\hat{y}]} d\hat{f} d\hat{g} d\hat{f}_1 d\hat{g}_1 d\hat{f}_2 d\hat{g}_2\end{aligned}\quad (2.18)$$

où l'astérisque * représente le complexe conjugué. Pour une source ponctuelle située sur l'axe et cohérente comme précédemment, $\tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) = \delta(\hat{f}, \hat{g})$, l'équation 2.6 est retrouvée.

L'interaction entre la paire (\hat{f}_1, \hat{g}_1) et (\hat{f}_2, \hat{g}_2) est ensuite représentée en introduisant le coefficient de transmission croisé, nommé TCC (de l'anglais "transmission cross coefficient") comme ci-dessous :

$$TCC(\hat{f}_1, \hat{g}_1; \hat{f}_2, \hat{g}_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) \tilde{P}(\hat{f} + \hat{f}_1, \hat{g} + \hat{g}_1) \tilde{P}^*(\hat{f} + \hat{f}_2, \hat{g} + \hat{g}_2) d\hat{f} d\hat{g} \quad (2.19)$$

L'équation 2.18 peut ainsi se réécrire sous la forme :

$$\hat{I}(\hat{x}, \hat{y}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} TCC(\hat{f}_1, \hat{g}_1; \hat{f}_2, \hat{g}_2) \tilde{O}(\hat{f}_1, \hat{g}_1) \tilde{O}^*(\hat{f}_2, \hat{g}_2) e^{-i2\pi[(\hat{f}_1 - \hat{f}_2)\hat{x} + (\hat{g}_1 - \hat{g}_2)\hat{y}]} d\hat{f}_1 d\hat{g}_1 d\hat{f}_2 d\hat{g}_2 \quad (2.20)$$

Une source hors-axe située à la limite de la pupille peut alors être imaginée comme représenté sur la figure 2.8 et défini par :

$$\tilde{J}(\hat{f}, \hat{g}) = \delta(\hat{f} - 1, \hat{g}) \quad (2.21)$$

L'équation 2.14 peut se réécrire :

$$\hat{I}(\hat{x}, \hat{y}) = \left| \int_{-1}^{+1} \tilde{P}(\hat{f}, \hat{g}) \tilde{O}(\hat{f} - 1, \hat{g}) e^{-i2\pi[\hat{f}\hat{x} + \hat{g}\hat{y}]} d\hat{f} d\hat{g} \right|^2. \quad (2.22)$$

En considérant le réseau unidirectionnel étudié dans l'équation 2.8, il est possible de réécrire l'équation précédente de sorte que :

$$\begin{aligned} \hat{I}(\hat{x}) &= \left| \int_{-1}^{+1} \frac{\hat{d}}{\hat{p}} \text{sinc}[(\hat{f} - 1)\hat{d}] e^{-i2\pi\hat{x}(\hat{f} - 1)} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(\hat{f} - \frac{m}{\hat{p}}) d\hat{f} \right|^2 \\ &= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left| \sum_{m=-0}^{+2m_0} \text{sinc}\left(\frac{m\hat{d}}{\hat{p}}\right) e^{\frac{2\pi m\hat{x}}{\hat{p}}} \right|^2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

En respectant l'équation 2.11, le résultat suivant est obtenu :

$$\hat{p}_{min} = \frac{1}{2} \quad (2.24)$$

Ce phénomène est s'illustre facilement comme sur le graphique 2.8. Il est en effet simple de constater que lorsque l'ordre 0 est placé à l'extrémité du cercle, la position maximale de l'ordre 1, pour être captée, ne vaut non plus 1 dans l'espace (\hat{f}, \hat{g}) (le rayon du cercle) tel que cela était le cas lors de l'utilisation d'une source sur axe avec laquelle la raie d'ordre nul serait placée au centre, mais 2, le diamètre de ce dernier. Il est à noter cependant que lors de l'utilisation de cette technique, seul un rayon

de la paire ± 1 est capté, impactant ainsi la qualité de la lithographie. Sachant que la distance entre deux rayons de diffraction d'ordre successif vaut $\frac{1}{\hat{p}}$, son expression sera :

$$\frac{1}{\hat{p}_{min}} = 2$$

$$\hat{p}_{min} = \frac{1}{2}$$

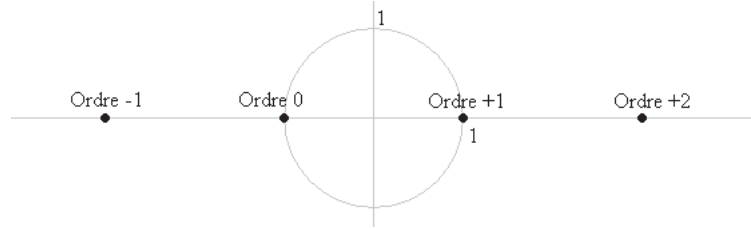


FIGURE 2.8 – Illustration de la limite de résolution avec une source hors-axe telle que $\tilde{f} = \delta(\hat{f} - 1, \hat{g})$ pour un réseau de pas $\hat{p} = 0.5$

L'utilisation d'une telle technique pour imprimer des motifs petits, dit agressifs, devient alors particulièrement intéressante. En effet, en utilisant une illumination hors-axe, le critère de Reighley peut être diminué dans l'équation 1.1.

En pratique, pour un scanner avec une ouverture numérique de $NA = 1.35$, une longueur d'onde de $193nm$, une paire de raies situées en $(\hat{f}_1, \hat{g}_1) = (-1, 0)$ et $(\hat{f}_2, \hat{g}_2) = (+1, 0)$ et un facteur de grandissement $G = \frac{1}{4}$, la résolution limite théorique sur le wafer p_{min} est, pour un réseau de ligne/espace :

$$p = Gp'$$

$$p' = \frac{1}{G} \frac{\lambda}{NA} \hat{p}$$

$$p = \hat{p} \frac{\lambda}{NA}$$

$$p_{min} = \hat{p}_{min} \frac{\lambda}{NA}$$

$$p'_{min} = 72nm$$

En procédant de même, il est envisageable de démontrer que la résolution limite d'un réseau de contact, représentant un réseau de trou, est de :

$$\hat{p}_{min} = 0.61 \tag{2.25}$$

2.4 Source effective

La source utilisée en lithographie peut donc être constituée d'un point unique, d'un ensemble de points, d'une surface, et peut être située sur ou en dehors de l'axe optique. Toutes ces sources doivent cependant être représentées dans une nomenclature standardisée afin de pouvoir les étudier plus facilement.

Afin de faciliter cette représentation, la notion de source effective est alors introduite. La source effective représente l'image de la source optique dans le plan de la pupille de sortie, et ce en ne prenant pas en compte la diffraction induite par le motif. Ce plan possède l'avantage flagrant de pouvoir facilement représenter le cercle de la pupille de sortie qui joue le rôle de filtre passe bas du système.

De plus, afin de pouvoir rendre la compréhension de la source encore plus facile, le rayon du cercle de cette pupille de sortie est standardisé afin de prendre la valeur de 1 (il est facile de réaliser cette opération en faisant intervenir la valeur de l'ouverture numérique de sortie du système). Les points constituant la source optique sont alors tracés en coordonnées polaires, tel que les valeurs d'angle d'ouvertures et de rayon sont données. Cependant, en pratique, le rayon d'un point de la source placé dans le cercle normalisé correspond à sa valeur σ , valeur du facteur de cohérence de ce dernier¹. Enfin, les valeurs d'angles données pour un point de la source sont en général, et ce pour des raisons de symétries abordées plus tard, données en valeur relative par rapport aux axes horizontaux, verticaux ou diagonaux du plan.

L'autre avantage de la représentation de la source effective est que cette dernière permet de pouvoir facilement représenter les diffractions induites par les motifs présents sur le masque, en dupliquant cette dernière et en la translatant des valeurs à déquates.

Toutes les sources représentées durant cette thèse seront donc représentées directement dans le plan de la pupille, et seront donc des sources effectives.

1. Le facteur de cohérence est déterminé par le rapport entre l'ouverture numérique du condenseur et l'ouverture numérique de la lentille de projection [40].

Chapitre 3

La technique d'optimisation Source Masque : état de l'art

3.1 Historique de la technique SMO

La technique de cooptimisation source masque voit le jour pour la première fois en 2004, lors d'une demande de brevet effectué par ASML [41]. Ces résultats sont ensuite présenté et publié à SPIE en 2005 [42]. Il faudra attendre encore quelques années avant que la technique ne succite un réel intérêt des industrielles [43] [44] [45] [46] [47]. La techniques décrite par la publication initiale décrit l'interdépendance entre la modification du masque afin d'obtenir des meilleurs résultats d'impressions, et le choix de la source optique utilisé pour la lithographie.

En effet, si la technique d'utilisation de source hors-axe décrite dans le chapitre précédent à été auparavant étudié et utilisé grâce à des sources dipôles [48], elle restait jusqu'à présent très limité dans son utilisation. Dans un premier temps la génération de la source optique par des éléments optiques diffractant tels que décrits dans la suite de ce chapitre restait limitante quant à la quantité de sources différentes possible [49]. Les sources utilisées restaient alors très simples. L'introductions d'appareils et de méthodologies plus complexes à permis l'utilisation de sources plus complexes, telles que les sources paramétriques. L'apparition sur le marché de la technologie Flexray [50] permet aujourd'hui de réaliser des sources optiques très complexes. Ce chapitre étudie les différentes notions décrite dans cette introduction, tels que les différents types de sources ainsi que les techniques utilisées pour les réaliser. Finalement, des tests des outils disponibles sur le marché et des méthodologies accessibles vont nous permettre d'illustrer à l'aide de mesures sur plaquettes les avantages proposés par cette nouvelle technologie.

3.2 Les sources simples

S'il devient compréhensible au vue du chapitre précédent que l'utilisation d'une source hors-axe ponctuelle présente de nombreux intérêt quant à la qualité de la lithographie, l'utilisation de cette technique reste assez complexe. En effet, les calculs précédents ont été réalisé dans le cadre de sources parfaitement ponctuelles. Or en pratique, il n'est pas possible d'utiliser de tels sources ponctuelles. Il devient alors nécessaire de créer des sources qui tentent à s'en rapprocher le plus possible pour garder les propriétés physique de cette dernières.

Ainsi, les premières études réalisés dans l'industrie portaient sur des sources de type dipôle, tel que représentée sur la figure 3.1(d)[48].

Cependant, si ce type de source donne de très bon résultats pour des stuctures de type ligne espace, ce n'est pas le cas pour des motifs différents et plus complexe. De nombreuses autres sources ont alors vu le jour, afin de palier ce problème. Quelques exemples des plus communs sont illustrés sur la figure 3.1. Ces sources particulières ont été sélectionner ici car ce sont les sources de bases de la suite de la thèse, notamment lors de la description des sources paramétriques.

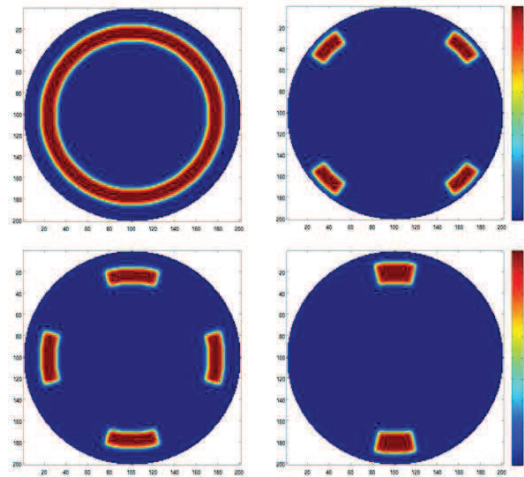


FIGURE 3.1 – Illustration des sources simples les plus répandues

- a) source annulaire. b) source quasar.
c) source c-quad. d) source dipôle.

Usuellement, la représentation d'usage pour visualiser les sources est celle de la source effective décrite dans la partie 2.3. L'intensité est normalisée de façon à ce que $I_{max} = 1$. Le rayon en coordonnées polaires d'un point est couramment appelé σ . Ainsi, chaque source est définie par ses valeurs σ_{in} , σ_{out} et l'angle d'ouverture pour un c-quad, un quasar ou un dipôle.

Ce sont ces sources que la technique de l'optimisation de la source SMO cherche à modifier afin d'optimiser les résultats, le plus souvent en cherchant à augmenter la taille de la fenêtre de procédé ou de la profondeur de champ.

3.3 Les sources optiques optimisées

3.3.1 Sources paramétriques

L'utilisation d'une source particulière va alors impacter les résultats de la lithographie. De nombreuses études ont pu être réalisées sur ces sources simples afin de montrer les avantages de ces derniers. Le chapitre suivant s'attache également à proposer des méthodes théoriques qui illustrent l'impact du choix d'une source sur la qualité de la lithographie.

Cependant, en général une source est choisie en corrépondance avec un unique design. Par exemple un dipôle sera choisi pour améliorer la qualité de la lithographie sur un ensemble de lignes espacées, mais dégrade d'autres types de motifs.

Afin de palier ce problème, il est alors possible d'utiliser une somme de sources simples, soit en même temps soit les unes après les autres. Cette nouvelle source artificiellement créée à partir de sources simples est appelée source paramétrique.

Plusieurs exemples sont représentés sur le graphique 3.2, où jusqu'à 4 sources simples sont sommées. Plus de 4 contributions différentes peuvent être utilisées. Ces sources sont dites paramétriques, car leur description peut s'effectuer en listant les différents paramètres qui la composent, tels que sur la légende du graphique 3.2. Chaque contribution à une source paramétrique est caractérisée non seulement par ses propres valeurs de σ , mais également par une valeur d'intensité relative par rapport aux autres contributions. Usuellement, la contribution dont l'intensité relative est la plus importante est normalisée avec une intensité de 1.

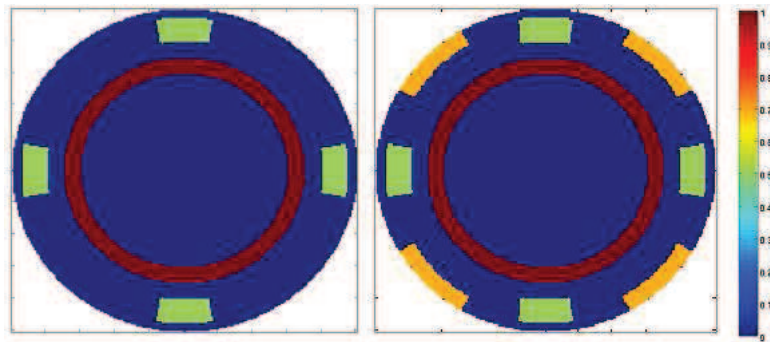


FIGURE 3.2 – Exemples de sources paramétriques :

a) Deux contributions :

Annulaire, $I = 1$, $\sigma_{in} = 0.6$, $\sigma_{out} = 0.7$ + Cquad, $I = 0.5$, $\sigma_{in} = 0.8$, $\sigma_{out} = 0.95$, angle d'ouverture (dit OA pour open angle) $OA = 20^\circ$

b) Quatre contributions :

Annulaire, $I = 1$, $\sigma_{in} = 0.6$, $\sigma_{out} = 0.7$ + Cquad, $I = 0.5$, $\sigma_{in} = 0.8$, $\sigma_{out} = 0.95$, $OA = 20^\circ$ + Quasar $I = 7$, $\sigma_{in} = 0.9$, $\sigma_{out} = 1$, $OA = 30^\circ$ + c-quad, $I = 0.8$, $\sigma_{in} = 0.4$, $\sigma_{out} = 0.6$, $OA = 30^\circ$

3.3.2 Sources freeform

S'il est possible d'ajouter quelques sources simples pour en faire une source paramétrique optimisée, il est également possible d'utiliser une très grande quantité de contributions différentes. En effet, jusqu'à ce point de l'étude, seules des formes géométriques simples ont été étudiées. Mais, pour augmenter le nombre de degrés de liberté, la forme de chaque contribution ne doit pas se limiter à une librairie de formes géométriques, mais doit être complètement libre. Idéalement, la source peut ainsi être définie comme une carte d'intensité lumineuse lui permettant de se libérer des contraintes liées aux formes géométriques définissant les sources paramétriques. Les sources dites pixélisées, ou freeform, sont ainsi définies. Le graphique 3.3 donne deux exemples de sources freeform plus ou moins complexes.

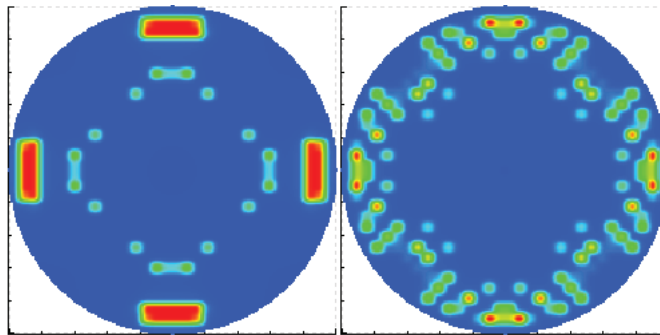


FIGURE 3.3 – Deux exemples de sources freeforms.

Les bénéfices de telles sources peuvent être mesurés sur un ensemble de motifs simples. Deux motifs ont été étudiés : un motif unidirectionnel de type ligne espace (40nm/100nm) et un motif en deux dimensions constitué d'un carré répété (60nm/140nm). Grâce à un algorithme d'optimisation de la source et du masque (voir partie 3.3.3), sont obtenues les sources optimales, simple (annulaire), paramétrique et freeform, comme représentées sur le graphique 3.4. Les fenêtres de procédés ainsi que les courbes de latitude d'exposition des trois sources sont alors comparées et représentées sur le graphique 3.5. La source freeform permet d'obtenir de meilleurs résultats, avec une profondeur de champ plus importante, alors que la source annulaire, même optimisée donne la plus petite fenêtre de procédé ainsi que la profondeur de champ la plus faible.

3.3.3 La génération de la source

Plus l'ensemble des motifs sur lesquels la source doit être optimisée est grand, plus le calcul permettant de trouver la source optimale devient complexe. De nombreux logiciels sont vendus pour leurs algorithmes de génération de sources. Dans le cadre de cette thèse, le logiciel Tachyon proposé par la compagnie Brion Technology, une

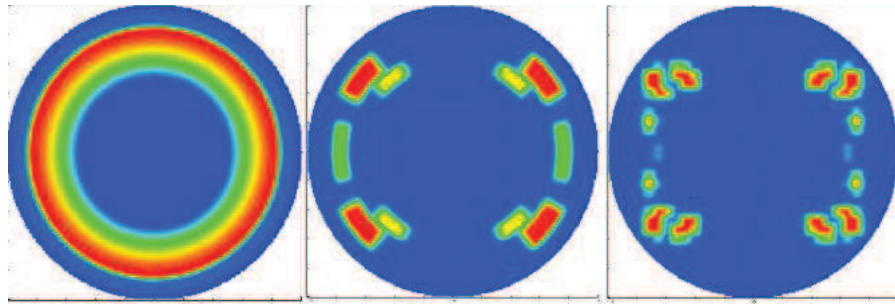


FIGURE 3.4 – Sources optimisées pour l'ensemble de structure : source simple annulaire, source paramétrique et source freeform.

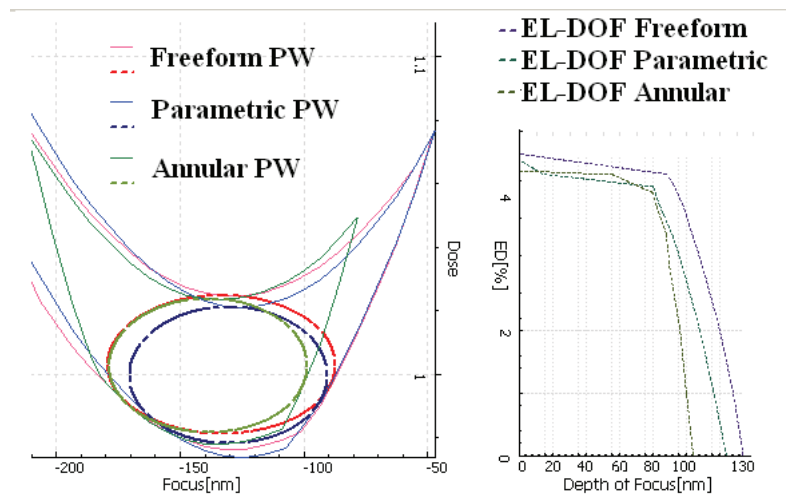


FIGURE 3.5 – Résultats en fenêtre de procédé et en courbe de latitude d'exposition pour les trois sources optimisées. La source freeform donne les meilleurs résultats pour le cas particulier des structures utilisées.

filiale du groupe ASML, ainsi que le logiciel de la compagnie Mentor Graphics, appelé Calibre SMO ont été utilisés. Chacun de ces logiciels possède en propre un panel d'outils, des différences d'utilisation et d'interface, une méthode d'obtention de la source ainsi que du masque, etc... A partir des motifs étudiés ces logiciels permettent d'obtenir une source optimisée ainsi que le masque après OPC associé à cette source. L'obtention d'un couple source masque, optimisé pour un ensemble de structures, définit la méthode SMO.

Cependant, pour des raisons de confidentialité, aucun de ces logiciels ne sera détaillé plus avant et aucune comparaison ne sera effectuée.

3.4 Flexray

Traditionnellement, les sources paramétriques telles qu'étudiées dans les sections précédentes sont réalisées à l'aide d'éléments optiques diffractant, dit DOE pour l'anglais "*Diffracting Optical Elements*". Ces éléments sont des objets physiques placés entre le laser et le système optique, tels que représentés sur le graphique 3.6. Leur construction particulière est étudiée de façon à ce que les rayons optiques sortant de ces éléments puissent créer la source lumineuse désirée. Ils sont constitués d'un ensemble d'éléments optiques tels des prismes, des lentilles etc... Afin de générer des raies optiques formant la source souhaitée. Ces éléments permettent ainsi de créer des sources simples telles que les sources c-quad, annulaire, quasar etc... Certains éléments peuvent être étudiés également pour reproduire des sources plus complexes, telles que les sources paramétriques complexes, voir certaines sources freeform.

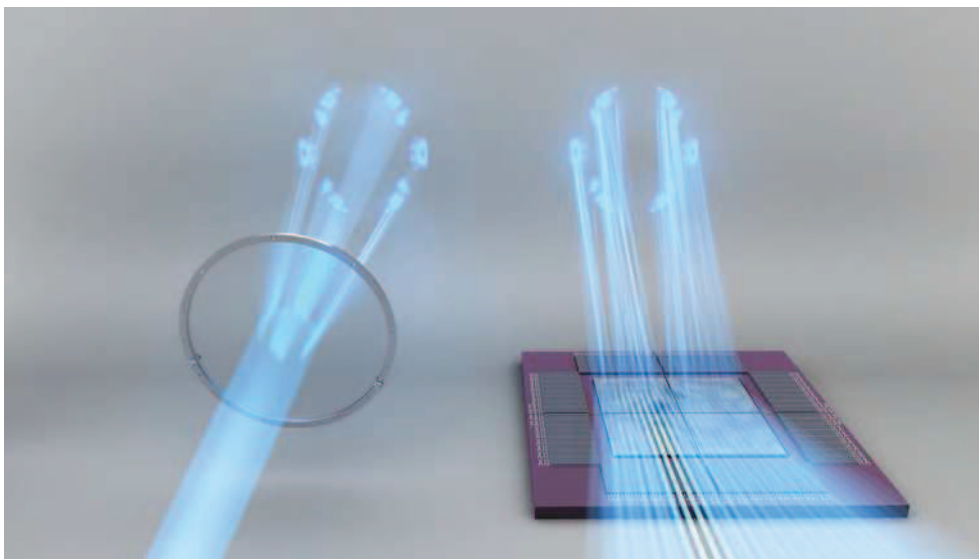


FIGURE 3.6 – Illustration du procédé DOE (à gauche) et Flexray (à droite). Les micros miroirs permettent d'obtenir la forme de source souhaitée.

Cependant, de tels éléments sont rapidement limités dans le cadre des techniques avancées de lithographie telle que l'optimisation de la source. En effet, à chaque nouvelle source créée, un nouveau DOE doit être créé et le prix de ces derniers devient rapidement très élevé en fonction de la complexité de la source associée.

Dans la dernière génération de scanners commercialisés par l'entreprise ASML, à savoir les scanners de la génération NXT :1950i, une avancée technologique permet de s'affranchir des DOE. Cette innovation, appelée Flexray se base sur un ensemble de micro-miroirs mouvants. Grâce à un tel jeu de miroirs, il est possible de contrôler la direction des rayons lumineux se réfléchissant sur ce dispositif représenté sur l'image 3.6.

Ainsi, en bougeant les micros miroirs, il est possible de créer la forme de source optique souhaitée. L'intérêt d'une telle technologie est avant tout la polyvalence. En effet, les micros miroirs n'étant pas fixés et pouvant bouger de façon autonome, il est possible à l'aide d'un tel dispositif de créer n'importe quelle source de façon assez rapide. Ainsi, lors d'un changement de technologie ou de niveau, il est possible de créer une nouvelle source sans avoir à changer l'élément DOE comme nécessaire auparavant. En effet, la génération d'une nouvelle source optique à partir d'un fichier définissant la forme de la source (fichier .src) s'effectue dans un temps très court, quelques minutes tout au plus.

Sur l'outil Flexray, la matrice de miroir est une matrice de $201 * 201$ miroirs. Le choix en terme de création de carte d'intensité lumineuse est donc très vaste.

De nombreux avantages peuvent être trouvés dans l'utilisation d'un tel outil. En effet, la source s'affranchit dorénavant de toutes les contraintes physiques de fabrication des DOE, ainsi que du coût de ces éléments. L'un des gros avantages d'un tel outil est la facilité de reproductibilité. D'un scanner à l'autre, les éléments DOE ne sont pas toujours exactement les mêmes et le moindre défaut de fabrication de l'un engendre des différences latentes qui ne peuvent être corrigés par la suite. De plus, le temps de changement de source est très largement réduit, puisqu'aucun élément ne doit être remplacé à l'intérieur du scanner. Ceci impacte également les risques intrinsèques dus au changement de DOE qui nécessitait jusqu'à présent des opérations lourdes et lentes.

3.5 Mesures et validation de la méthode

Les sections précédentes ont permis de mieux comprendre la théorie de l'optimisation des sources. Plusieurs façons d'améliorer la fenêtre de procédé ont ainsi été étudiées et les résultats de simulations montrent que cette technique apporte un réel gain sur les performances de la lithographie. Cette section va montrer les résultats pratiques de la technique SMO. Plusieurs cas sont ici étudiés pour mettre en avant ce gain de performance. Cette section ne s'attarde cependant pas sur le procédé d'optimisation de la source en lui-même et présuppose que les sources utilisées sont optimisées pour les technologies prises en compte.

3.5.1 Metall C028

Une première expérience a été réalisée afin de montrer le gain apporté par la technique SMO. Cette dernière a été effectuée sur un design du niveau métal 1 pour une technologie C028. En effet, au début de l'étude en 2009, la technique d'optimisation des sources n'était encore pas bien comprise ni utilisée. Les sources étaient encore des sources historiques définies par mimétisme des technologies précédentes. Elles ne présentaient pas d'optimisation. Un premier travail réalisé a permis de vérifier les résultats théoriques de gain en process window.

Pour ce faire, deux OPC différents ont été réalisées pour une même structure. Chacun de ces OPC a été généré avec une source différente. La partie optique du modèle modifiée lors du processus itératif de l'OPC a permis de faire tourner ces deux OPC avec deux sources optiques différentes. Le premier OPC est donc réalisé en utilisant une source de type Cquad, visible sur le graphique 3.7, source historique du métal 1 de la technologie précédente. Cette source a longtemps été considérée comme un candidat viable pour la technologie C028 pour la seule raison qu'elle était utilisée sur la technologie précédente. Il n'est de ce fait pas aberrant de s'en servir comme référence. Le second OPC a été réalisé avec une source optimisée via un logiciel spécialisé. La source de type Freeform est représentée sur le graphique 3.7.

Les deux OPC ont été réalisées sur une petite partie de design uniquement et la source Freeform optimisée sur ce même design. Elle est donc optimale pour cette partie très spécifique du design, mais il n'est pas garanti qu'elle génère de bons résultats pour le reste du métal C028. Ces deux OPC ont ensuite été portés sur un prototype de masque, puis exposés en salle blanche à l'aide d'un scanner permettant la réalisation des sources Freeform. En utilisant ce masque, deux plaquettes de silicium ont été réalisées, une pour chaque source.

Le scanner étant de type "scan & repeat", il permet d'obtenir plusieurs puces représentant le même motif sur une même plaque. Afin de mieux mesurer les différences induites par le changement de source, chaque puce a été exposée avec des conditions d'illuminations différentes, par un procédé appelé FEM. Il est ainsi possible de mesurer les différentes puces à ces différentes conditions de dose et focus, permettant une mesure de la fenêtre de procédé.

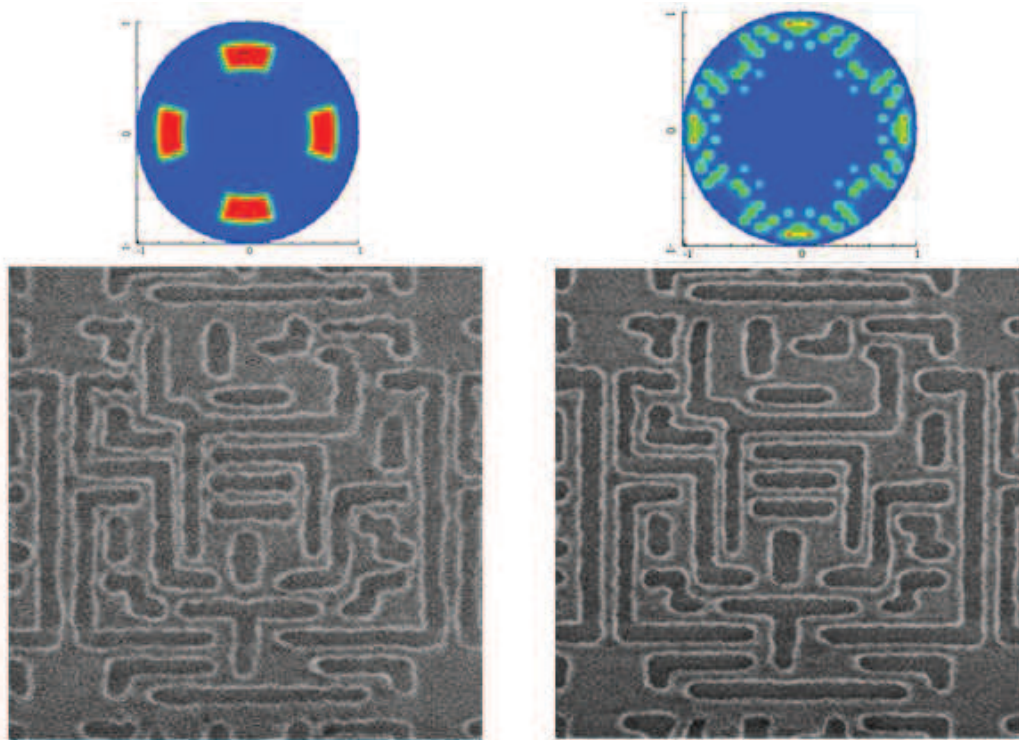


FIGURE 3.7 – Mesure SEM de la différence induite par la modification de la source sur un extrait de la logique en métal 1 C028. Chaque résultat est obtenu en utilisant les sources associées à la fois dans le modèle optique utilisé lors de la génération de l'OPC ainsi que sur le scanner lors de l'exposition de la plaquette de silicium. Les résultats obtenus avec la source Cquad sont sensiblement moins bons que les résultats obtenus avec la source freeform.

Ces deux plaques ont ensuite été mesurées en salle blanche sur un microscope électronique à balayage (MEB, plus généralement appelé SEM de l'anglais Scanning Electron Microscopy), aux endroits correspondants respectivement à l'OPC optimisé pour la source utilisée. Sont alors obtenus deux résultats sensés être en adéquation avec les simulations effectuées lors de la réalisation de ces OPC. Les mesures sont représentées sur l'image 3.7 et illustrent bien le gain en résolution apporté par la technique SMO. En effet, sur l'image créée grâce à l'OPC et la source Cquad, de nombreux défauts apparaissent. Certains bouts de lignes ont des fluctuations et certains bords de la résine ne forment pas une ligne suffisamment droite. De la même façon, les angles ne sont pas suffisamment bien définis. Il est tout à fait possible de quantifier ces problèmes grâce aux détecteurs ORC introduits dans la première partie. Cet OPC peut alors être qualifié de largement insuffisant puisqu'aucune fenêtre de procédé ne lui est associée, le résultat n'étant pas acceptable même aux meilleures conditions. D'un autre côté, les images obtenues suite à l'utilisation de la source Freeform sont

de meilleure qualité. Les problèmes de bouts de lignes fluctuants ont été résolus et l'image est propre. Il est par ailleurs possible de mesurer de la même façon les images à différentes conditions de la fenêtre de procédé afin d'établir des limites à cette dernière, telles qu'illustrées sur l'image 3.8.

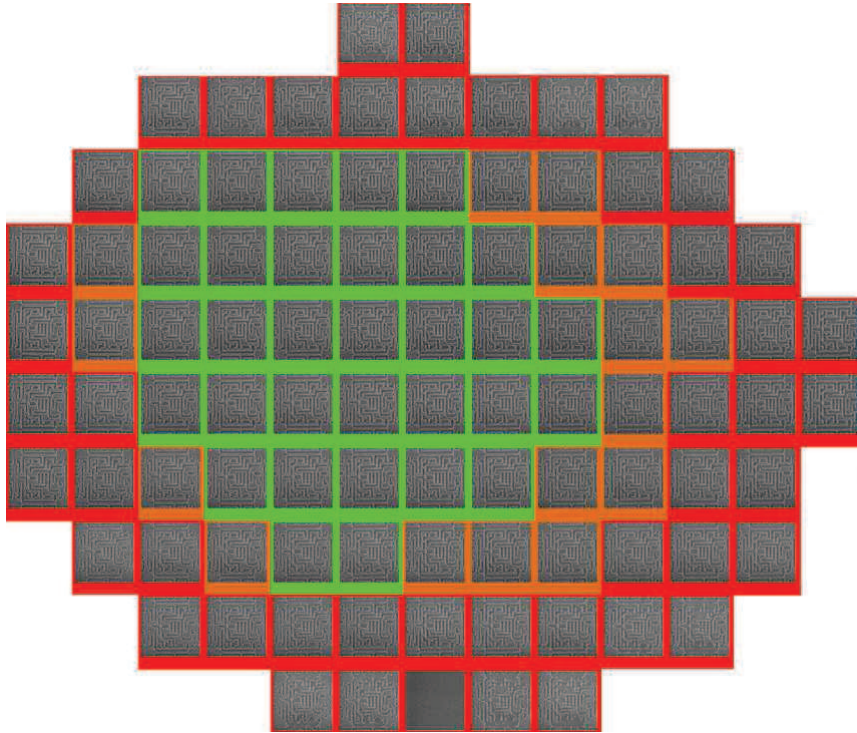


FIGURE 3.8 – Mesure du motif métal 1 C028 imprimé par la technique de SMO pour différentes conditions de focus en abscisse et de dose en ordonnée. De telles mesures nous permettent de mesurer la fenêtre de procédé d'impression de ce motif. Ici les unités ne sont pas données car elles n'apportent pas d'information intéressante.

Il est à noter que les images résines obtenues en simulation et les images mesurées ne concordent pas parfaitement, ce qui illustre un problème dans la partie résine du modèle. Ce problème traité par la suite est considéré pour l'instant comme négligeable.

3.5.2 Vias C020

De la même manière, il est possible d'étudier le comportement de structures périodiques. Le niveau C020 Via est composé d'un réseau de trous dont la taille du pas doit être de 110nm. La technologie précédente présentait un réseau de trous de pas de 127nm et la source utilisée était une source annulaire.

Toutefois, il est possible de constater sur les mesures SEM que l'utilisation d'une source annulaire ne permet plus de reproduire de manière fidèle un pas de 110nm. Afin de continuer à imprimer ce niveau via C020 sans avoir à utiliser une technique de double exposition, la technique d'optimisation de source a été utilisée. Les résultats montrés sur le graphique 3.9 illustrent cette optimisation et l'amélioration des résultats qui en découle.

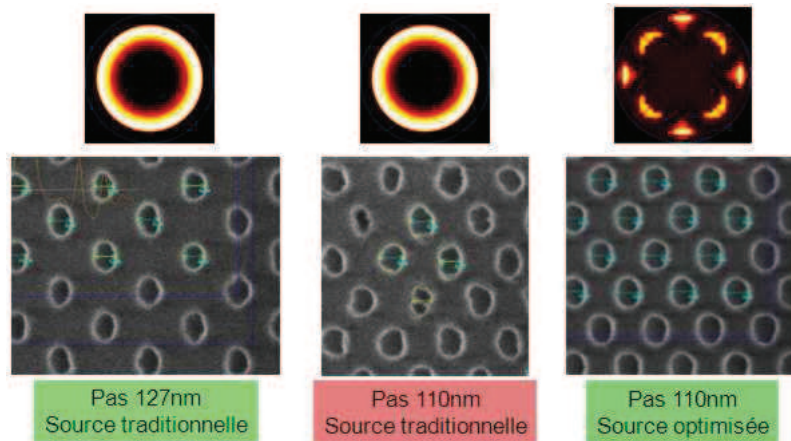


FIGURE 3.9 – Mesure SEM de la différence induite par la modification de la source sur le niveau via C020.

Par ces deux exemples il est possible de montrer que la technique d'optimisation de source SMO tient parfaitement les promesses avancées par la théorie. Ainsi, chaque niveau de chaque technologie peut être amélioré en modifiant la source lumineuse utilisée.

Chapitre 4

Optimisation de la source optique

Afin de mieux comprendre la technique d'optimisation de la source, et afin de comparer les résultats donnés par les différents logiciels industriels, il devient intéressant d'étudier la physique intrinsèque à l'optimisation de la source. En effet, cette dernière étant basée sur la physique de la diffraction par un réseau, il devient possible en partant d'une simplification du problème de créer des sources optimisées simples. En partant du principe que le masque utilisé peut être décomposé en une somme simple de réseau à pas unique, et en étudiant les propriétés de ces derniers, une source optimisée peut être générée.

Une telle méthode a ainsi pu voir le jour dans le cadre de cette thèse, et ce chapitre va expliquer son fonctionnement ainsi que les résultats obtenus grâce à cette dernière. Une des applications premières de cette optimisation faite maison est qu'elle permet de générer une source optimisée beaucoup plus rapidement que les méthodes classiques utilisées par les logiciels industriels. Il devient alors possible de comparer les résultats de ces derniers, non seulement avec une source simple mais également avec des sources optimisées simples.

4.1 Impact de la modification de la source

4.1.1 Variation de contraste en fonction de la source

L'utilisation d'une source optique hors-axe a pu prouver une amélioration de la fenêtre de procédé, ainsi que de la qualité des résultats obtenus à différents niveaux. La physique à l'origine d'une telle amélioration peut être étudiée, et nous permet de comprendre quels sont les critères menant à cette augmentation.

De plus, une fois ces critères déterminés, il devient alors facile de considérer le problème dans l'autre sens afin d'obtenir une source optimisée pour un certain motif.

Le premier critère de mesure de la qualité d'une source optimisée est le contraste. En effet, différentes optimisations de source vont donner différentes valeurs de contraste plus ou moins bonnes pour un même motif simple.

Dans un premier temps, l'impact d'une telle illumination sur le contraste sera étudiée de façon assez simple, en considérant un réseau simple unidirectionnel de pitch $\hat{p} = 0.6$ et une source ponctuelle centrée en $(\hat{f}, \hat{g}) = (\frac{1}{\hat{p}}, 0)$, ainsi que les deux images de diffraction créées par le réseau, décalées et placées respectivement en $(\hat{f}, \hat{g}) = (\frac{1}{\hat{p}}, 0)$ pour l'ordre 1 et en $(\hat{f}, \hat{g}) = (-\frac{1}{\hat{p}}, 0)$ pour l'ordre -1. Le cas d'une source annulaire avec ses deux images de diffraction est représenté sur la figure 4.2.

En effet, de la même façon que décrit précédemment pour un point source unique pour lequel les images de diffraction associées sont éloignées de la distance $n\frac{1}{\hat{p}}$ où n est la valeur de l'ordre de diffraction, les sources complexes sont reproduites par le phénomène de diffraction à cette même distance $n\frac{1}{\hat{p}}$ soit $n\frac{1}{\hat{p}}\frac{\lambda}{NA}$ tel que représenté sur la figure 4.1.

Augmenter le contraste présente un intérêt car il est lié à la valeur de la pente de la courbe d'intensité. La résistance aux problèmes de variation de dose est ainsi renforcée.

Ce calcul numériquement reprend les équations 2.9 et 2.15. En effet, ces deux équations peuvent être réécrites telles que pour chaque point de la source pour lequel seul l'ordre 0 est capté :

$$\hat{I}(\hat{x}) = \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2$$

et pour le cas où l'ordre $m = \pm 1$ est également capté :

$$\hat{I}(\hat{x}) = \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left| 1 + \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) e^{\frac{mi2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} \right|^2$$

En effectuant l'approximation (à l'ordre 1) suivante : $(1+x)^2 \approx 1+2x$, l'intensité totale ci-dessous est obtenue. Les notations A , A_0 , A_1 , A_{-1} et $A_{\pm 1}$ représentent respectivement les aires, où l'ordre zéro est capté (toute la source donc), où seul l'ordre zéro est capté, où l'ordre +1 est capté, où l'ordre -1 est capté et où l'ordre +1 ou l'ordre -1 est capté. Il est possible d'écrire $A = A_0 + A_1 + A_{-1}$, et $A_{\pm 1} = A_1 + A_{-1}$. De plus, les sources

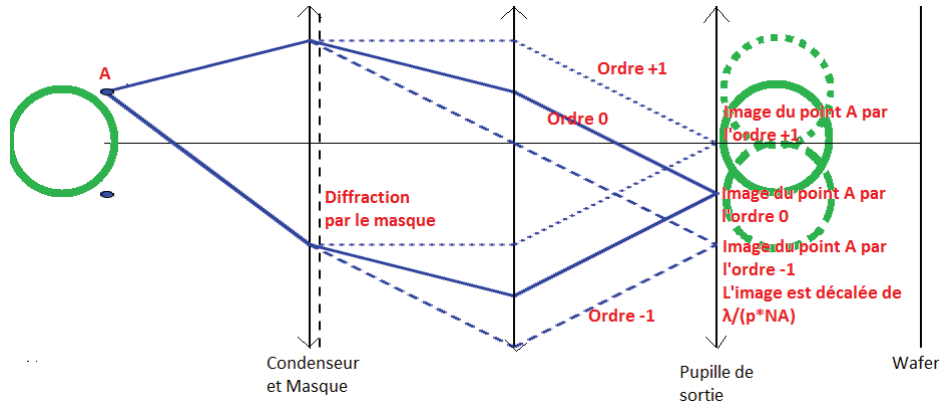


FIGURE 4.1 – Phénomène de diffraction dans le système optique de Köhler.

Il est possible d'expliquer le phénomène de diffraction dans le système optique de Köhler en considérant un seul point issue de la source (ici annulaire). Le point A est donc le point supérieur de la source annulaire. Les rayons issus de ce point A vont être capturés par le condenseur et diffractés par le masque (les traits pointillés représentent les ordres ± 1 de diffraction, les autres ordres ne sont pas représentés pour ne pas alourdir le schéma). Chaque rayon issu des ordres 0 et ± 1 sont captés par la seconde lentille du système afin de former l'image de diffraction sur le plan de la pupille. Les rayons issus du masque se recomposent sur le plan du wafer ne sont pas représentés ici. Le schéma ci-dessus ne représente que les rayons issus du point A, point supérieur de la source annulaire, il est donc possible de retracer l'annulaire associé aux rayons (placé au dessus puisque l'image est inversé d'après les lois de l'optique). Cette opération peut être effectuée pour chaque ordre de diffraction et plusieurs annulaires apparaissent alors, chacun représentant un ordre de diffraction (3 ordres sont représentés ici mais en pratique une infinité d'ordres peut être capté). Chaque ordre est décalé de la valeur $\frac{1}{p}$, soit une distance dans le plan de la pupille de $\frac{\lambda}{p \cdot NA}$. La pupille étant un disque de rayon 1, seules les images de diffractions définies sur le disque unitaire vont alors participer à la recombinaison de l'image du masque sur le wafer.

étant symétriques, $A_1 = A_{-1}$.

$$\begin{aligned}
 \hat{I}(\hat{x})_{totale} &= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left| A_0 + A_1 \left[1 + \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) e^{\frac{i2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} \right]^2 + A_{-1} \left[1 + \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) e^{\frac{-i2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} \right]^2 \right| \\
 &= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left[A_0 + A_1 + 2A_1 \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) e^{\frac{i2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} + A_{-1} + 2A_{-1} \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) e^{\frac{-i2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} \right] \\
 &= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left[A + 2A_1 \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) \left(e^{\frac{i2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} + e^{\frac{-i2\pi\hat{x}}{\hat{p}}} \right) \right] \\
 &= \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right)^2 \left[A + 2A_{\pm 1} \cos \left(\frac{2\pi\hat{x}}{\hat{p}} \right) \text{sinc} \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Les valeurs d'intensité maximale sont trouvées pour les valeurs du cosinus valant ± 1 . Ainsi :

$$\hat{I}(\hat{x})_{min} = \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}}\right)^2 \left[A - 2A_{\pm 1} \text{sinc}\left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}}\right) \right]$$

$$\hat{I}(\hat{x})_{max} = \left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}}\right)^2 \left[A + 2A_{\pm 1} \text{sinc}\left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}}\right) \right]$$

Le contraste est alors défini par l'équation :

$$\begin{aligned} \text{Contraste} &= \frac{A + A_{\pm 1} 2 \text{sinc}(\hat{d}/\hat{p}) - A + A_{\pm 1} 2 \text{sinc}(\hat{d}/\hat{p})}{A + A_{\pm 1} 2 \text{sinc}(\hat{d}/\hat{p}) + A - A_{\pm 1} 2 \text{sinc}(\hat{d}/\hat{p})} \\ &= 2 \text{sinc}\left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}}\right) \frac{A_{\pm 1}}{A} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Un tel résultat peut être mis en évidence en effectuant l'opération pour deux sources différentes, une source annulaire et une source c-quad ($\sigma_{in} = 0.75$, $\sigma_{out} = 0.9$, 30° d'ouverture). Les ordres de diffraction captés par la pupille peuvent être tracés sur la figure 4.2. Il est possible de comparer dans chacun des deux cas la quantité de rayons d'ordre ± 1 capté par la pupille, ainsi que la quantité de rayons d'ordre 0, dans le cas particulier où $\text{sinc}\left(\frac{\hat{d}}{\hat{p}}\right) = 0.5$.

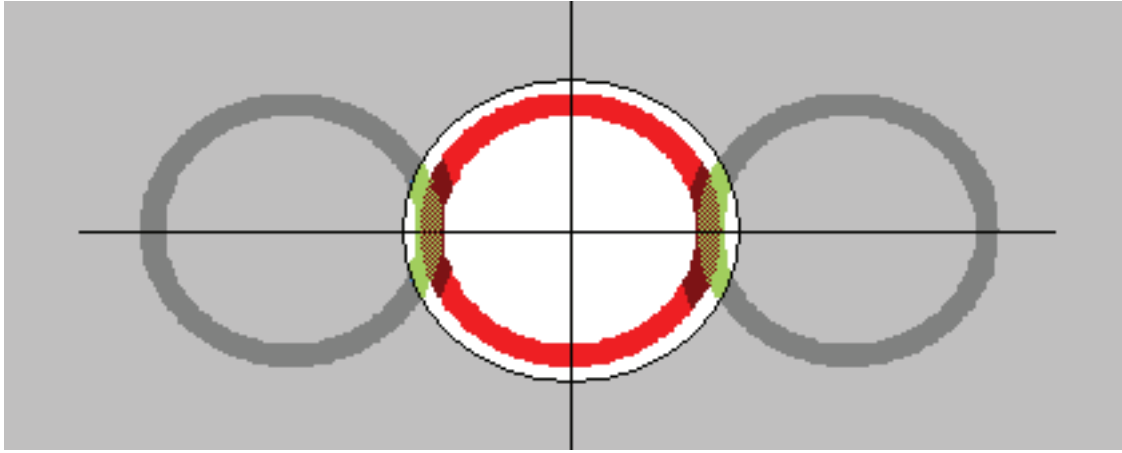


FIGURE 4.2 – Illustration des ordres de la diffraction de la source sur le plan pupille pour une source annulaire et une source c-quad.

En rouge (clair et foncé) la source initiale, A , en rouge foncé, la zone $A \pm 1$ où les ordres ± 1 sont captés et en vert les ordres ± 1 .

Les valeurs suivantes sont obtenues pour la source annulaire :

$$A = \pi.(\sigma_{out}^2 - \sigma_{in}^2) = 0.78$$

$$A_{\pm 1}^I = 0.11$$

Le rapport des aires est donc de :

$$\frac{A_{\pm 1}}{A} = 0.14$$

Pour la source c-quad, un pôle sur quatre est capté pour l'ordre 1 et un second est capté pour l'ordre -1^{II}. Le rapport d'intensité est donc :

$$\frac{A_{\pm 1}}{A} = 0.25$$

Enfin, à l'aide d'un logiciel de simulation optique, ici le logiciel Panoramic, l'image aérienne de ces cas particuliers peut être simulée. Ces simulations sont représentées sur le graphique 4.3. En comparant les deux sources, les résultats suivants sont obtenus par simulation informatique :

Pour la source annulaire :

$$I_{min} = 0.28$$

$$I_{max} = 0.35$$

$$Contraste = 0.11$$

Et pour la source c-quad :

$$I_{min} = 0.27$$

$$I_{max} = 0.40$$

$$Contraste = 0.19$$

I. Soit *Aire* l'aire de recouvrement de deux cercles de rayons r et R et séparés par la distance d , définie comme suit :

$$\begin{aligned} Aire(r, R, d) = & r^2 \cos^{-1}\left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dr}\right) + R^2 \cos^{-1}\left(\frac{d^2 + R^2 - r^2}{2dR}\right) \\ & - 1/2 \sqrt{(-d + r + R)(d + r - R)(d - r + R)(d + r + R)} \end{aligned}$$

L'aire A_1 d'intersection d'une source annulaire est alors définie par :

$$A_1 = Aire(1, \sigma_{out}, \frac{1}{\hat{p}}) - Aire(1, \sigma_{in}, \frac{1}{\hat{p}})$$

II. Cette hypothèse peut être vérifiée par le calcul de la position des points d'intersection des cercles de rayon σ_{in} . La distance verticale a qui sépare ces deux points d'intersection vaut :

$$a = \frac{1}{d} \sqrt{((r + R)^2 - d^2)(d^2 - (r - R)^2)}$$

L'angle d'ouverture maximale acceptable pour que le pôle du c-quad soit entièrement compris dans le cercle défini par la pupille est :

$$\theta_{max} = 2 \cdot \arctan \frac{a}{2}$$

Pour les valeurs de \hat{p} , σ_{in} et σ_{out} , cette valeur d'ouverture maximale est de 30° , soit la valeur de l'angle d'ouverture du c-quad.

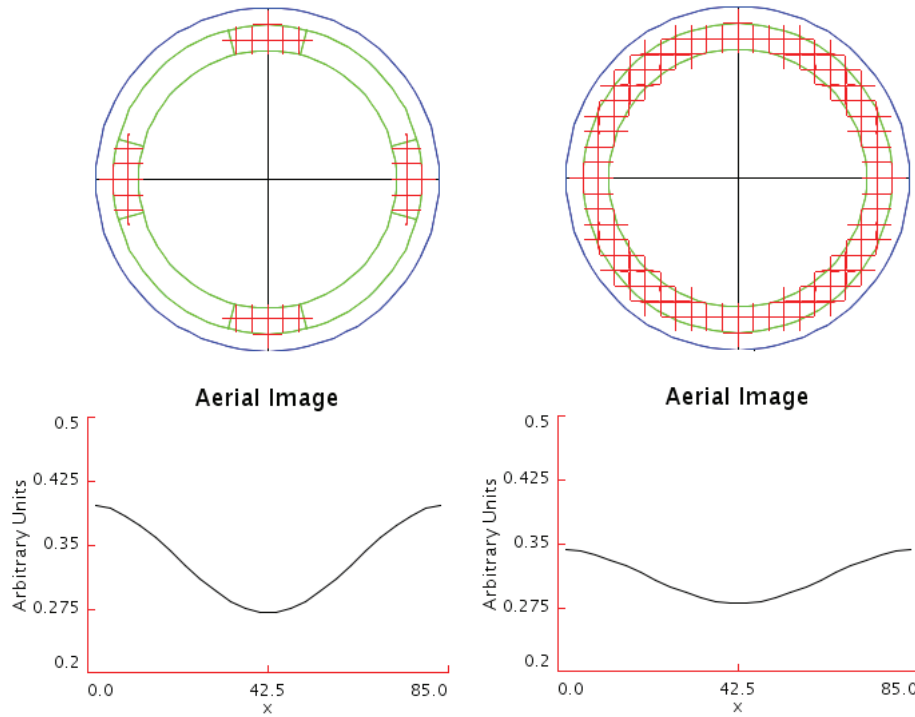


FIGURE 4.3 – Résultats simulés de l'image aérienne pour les différentes sources utilisées.

Il est alors possible de dire qu'il existe un lien entre le contraste obtenu et le rapport de l'aire dont au moins un ordre ± 1 est capté et l'aire dont seul l'ordre 0 est capté. Un lien direct entre le rapport des aires captées et le contraste ne peut cependant pas être extrapolé de façon indépendante du motif ou des conditions d'illumination. Cependant, le but de cette étude est d'entamer une réflexion sur l'utilité de choisir une source appropriée à un motif particulier. Ce but est ici parfaitement illustré.

4.1.2 Impact de σ

Par ailleurs, une autre étude peut également être menée pour illustrer l'intérêt d'utiliser une source optimisée. En effet, si le choix de la forme de la source peut influencer sur la latitude d'exposition, le choix des valeurs qui la définissent telles σ_{in} et σ_{out} peut également influencer.

En considérant deux rayons optiques cohérents, arrivant avec un angle ϕ , alors, il est possible de calculer la valeur du champ électrique résultant de l'interaction entre ces deux rayons de la façon suivante :

$$\begin{aligned} E(x) &= e^{-ik_x x} + e^{ik_x x} \\ &= 2 \cos(k_x x) \end{aligned} \tag{4.3}$$

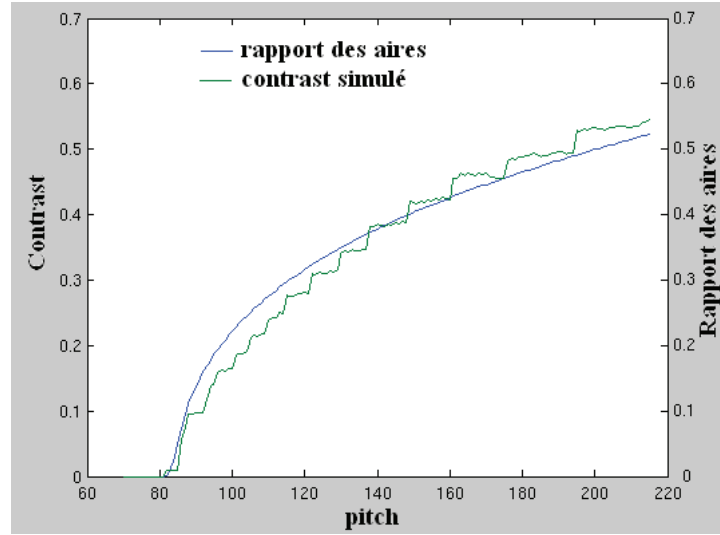


FIGURE 4.4 – Illustration de l'évolution du contraste et du rapport des aires en fonction du pitch.

avec $k_x = k \sin(\phi/2)$. L'intensité s'exprime alors :

$$\begin{aligned} I(x) &= |E(x)|^2 \\ &= 4 \cos^2 \left[\frac{2\pi n}{\lambda} \sin(\phi/2)x \right] \\ &= 2 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{4\pi n}{\lambda} \sin(\phi/2)x \right] \right\} \end{aligned}$$

Ces deux rayons incidents créent donc un champ périodique, de période :

$$p = \frac{\lambda}{2n \sin \frac{\phi}{2}} \quad (4.4)$$

Si le motif souhaité possède une période de même valeur, alors il sera plus aisé de l'imprimer sur le masque, contrairement au cas où ce dernier aurait une période totalement différente. Il convient alors de choisir les valeurs de σ de sorte que, pour une illumination hors-axe, les raies des ordres 0 et ± 1 forment un angle égal à ϕ . La valeur de σ pour laquelle le réseau de pas p souhaité et l'image de diffraction correspondent peut être retrouvée ainsi.

Il est également à noter que lors de l'utilisation d'une source hors-axe, le critère de l'unité de Rayleigh n'est plus applicable. En effet, les rayons arrivant sur le plan du wafer sont maintenant placés en dehors de l'axe optique. Si seuls les rayons d'ordre zéro étaient captés, pour une source symétrique, ces rayons arriveraient donc toujours avec une différence de marche nulle quelle que soit la valeur de défocus. Ainsi, seuls les rayons diffractés vont jouer un rôle sur la profondeur de champ. Il est possible de simplifier le problème en étudiant deux cas. Si les rayons diffractés d'ordre

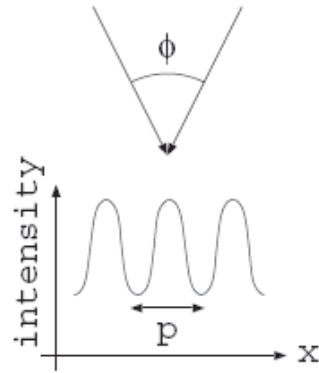


FIGURE 4.5 – Interférence constructive entre deux rayons cohérent, arrivant avec un angle ϕ . Il en résulte une intensité sinusoïdale de période $p = \frac{\lambda}{2n \sin \frac{\phi}{2}}$.

1 se retrouve diametralement opposé aux rayons de l'ordre zéro, ils sont confondus avec les rayons d'ordre 0 symétriquement opposés, et ne créent pas d'interférence lors du défocus. A l'inverse, s'il ne sont pas placés à l'opposé, ils vont créer des interférences. Ces interférences sont maximales lorsque le rayon diffracté est placé au centre de la pupille.

En pratique, cette notion n'est pas très utilisée, puisque les images aériennes sont calculées et étudiées afin de déterminer les meilleures valeurs de σ permettant un profondeur de champ maximale.

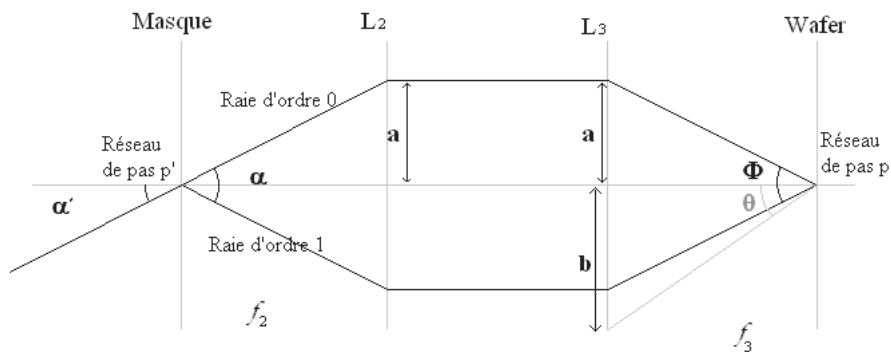


FIGURE 4.6 – Schéma du dispositif de Köhler, pour un réseau de pas p' , où les raies d'ordres 0 et 1 sont diffractées de façon symétrique à l'axe optique.

À l'ordre 1, le graphique 4.6 permet d'obtenir les équations suivantes :

$$\begin{aligned}\frac{\lambda}{p'} &= \sin \alpha \approx \alpha \\ \frac{b}{f_3} &= \tan \frac{\phi}{2} \approx \frac{\phi}{2} \\ NA &= \frac{a}{f_3} \\ p' &= p \frac{f_2}{f_3} \\ \sigma &= \frac{b}{a}\end{aligned}$$

De même, l'écart entre deux raies de diffraction peut être exprimé comme la variable *distance* représentant cet écart :

$$distance = \frac{1}{\hat{p}} \quad (4.5)$$

Il est ensuite possible d'étudier l'influence sur l'image aérienne des valeurs du pitch et de σ . Pour cela, un logiciel de simulation sera utilisé afin de simuler l'image aérienne pour chaque valeur de \hat{p} et pour chaque valeur de σ . Il devient intéressant de se concentrer dans un premier temps sur une seule paire de rayons optiques afin de mieux visualiser l'impact du sigma. Pour ce faire, le logiciel Panoramic a été utilisé avec une source dipôle d'angle d'ouverture de 10° et avec des valeurs de σ très proches, soit $\sigma_{out} = \sigma_{in} + 0.05$. Les simulations ont été réalisées sur un réseau tel que $CD = \frac{pitch}{2}$. Les valeurs de profondeur de champs (ici en échelle logarithmique) et de la pente maximale de l'image aérienne sont représentées sur les graphiques 4.7 et 4.8.

Différentes zones apparaissent clairement sur ces deux graphiques. Il est possible d'expliquer ce comportement en étudiant les ordres captés par la pupille en fonction du pitch et de la valeur de σ . En effet, si le pitch et σ sont tous deux trop petits, alors aucun ordre de diffraction n'est capté, comme illustré sur le graphique 4.9(a). Cela se produit lorsque la distance entre les deux raies est supérieure à $1 + \sigma$. En reprenant l'équation 4.5, il est possible de tracer la limite pour laquelle la raie d'ordre +1 est captée, définie par la relation suivante :

$$\frac{1}{\hat{p}} = 1 + \sigma \quad (4.6)$$

De même, il est possible de trouver la limite pour laquelle la raie d'ordre +2 est captée, comme représenté sur le graphique 4.9(b), limite définie par la relation :

$$\frac{2}{\hat{p}} = 1 + \sigma \quad (4.7)$$

Et ainsi de suite pour toutes les raies captées par le haut de la pupille.

De la même façon, la relation définissant la limite pour laquelle la raie d'ordre -1 est captée par le bas de la pupille, comme illustrée sur le graphique 4.9(c), est :

$$\frac{1}{\hat{p}} = 1 - \sigma \quad (4.8)$$

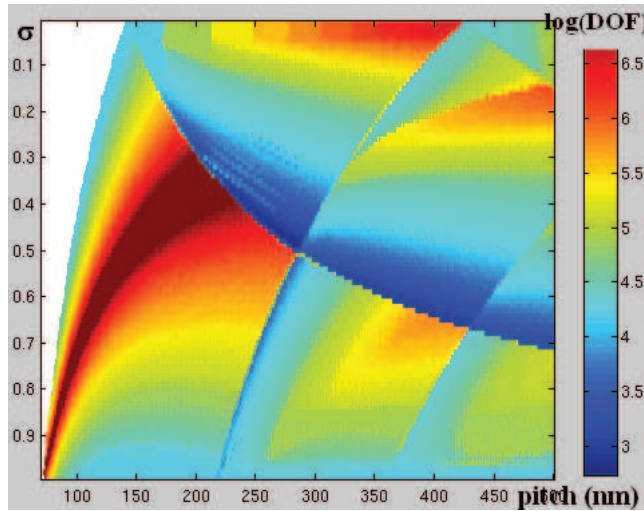


FIGURE 4.7 – Evolution de la profondeur de champ (DOF) en fonction du pitch et de la valeur de σ pour un dipôle 10° , $\sigma_{in/out} = \sigma \pm 0.01$, et $CD = pitch/2$.

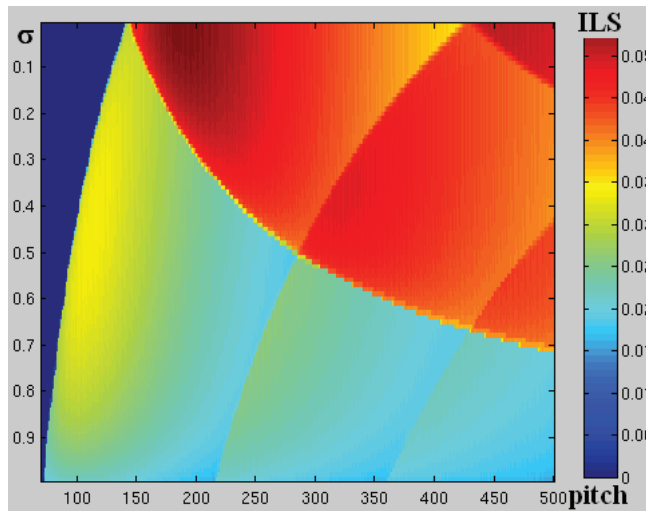


FIGURE 4.8 – Evolution de la pente maximale de l'image aérienne en fonction du pitch et de la valeur de σ pour un dipôle 10° , $\sigma_{in/out} = \sigma \pm 0.01$, et $CD = pitch/2$.

De la même manière, la raie d'ordre -2 est limitée par la relation suivante :

$$\frac{2}{\hat{p}} = 1 - \sigma \quad (4.9)$$

Toutes ces limites peuvent être représentées comme illustré sur le graphique 4.10. Ces courbes délimitent parfaitement les zones remarquable des graphiques 4.7 et

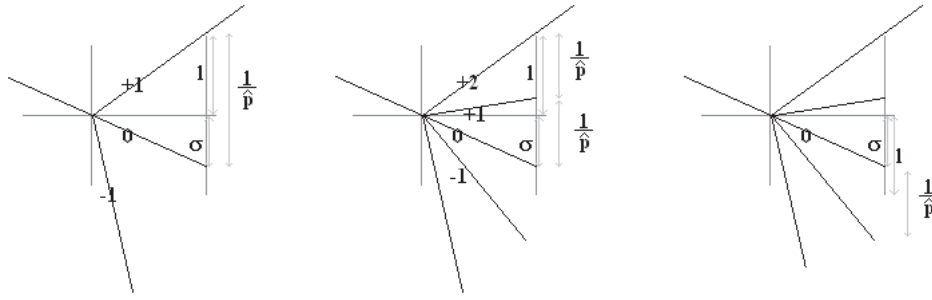


FIGURE 4.9 – Illustration des limites pour lesquelles les raies de différents ordres sont captées.

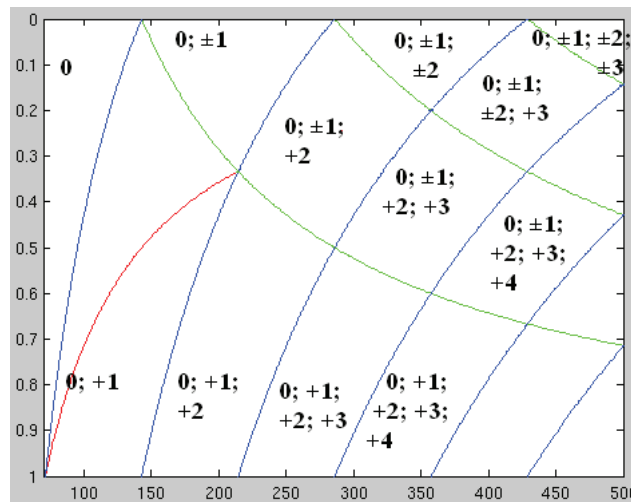


FIGURE 4.10 – Tracé des courbes délimitant le fait qu'une raie soit captée ou non par la pupille. En vert sont représentés les raies captés d'ordre négatif, et en bleue les raies d'ordre positif.

4.8. Cependant, les limitations d'ordre pair n'apparaissent pas sur ces graphiques. Ceci peut s'expliquer par le fait que $CD = pitch/2$. Les ordres pairs de la transformée de Fourier d'un tel réseau sont en effet nuls. Ce réseau ne produit donc pas de raies d'ordre pair et les délimitations induites n'apparaissent pas sur les graphiques. Afin de pallier ce problème, des simulations ont été refaites pour un réseau ayant une valeur du CD fixée telle que $CD = 45nm$ (cf. graphiques 4.11 et 4.12).

Le comportement du graphique aux intersections des zones est lui aussi parfaitement explicable. Il est remarquable, dès lors qu'un nouvel ordre de diffraction est capté par la pupille, que la profondeur de champs a tendance à diminuer de façon drastique. Ce comportement est expliqué sur le graphique 4.13. En fonction du nombre d'ordre captés par la pupille ainsi que leurs angles d'incidence respectifs, le point

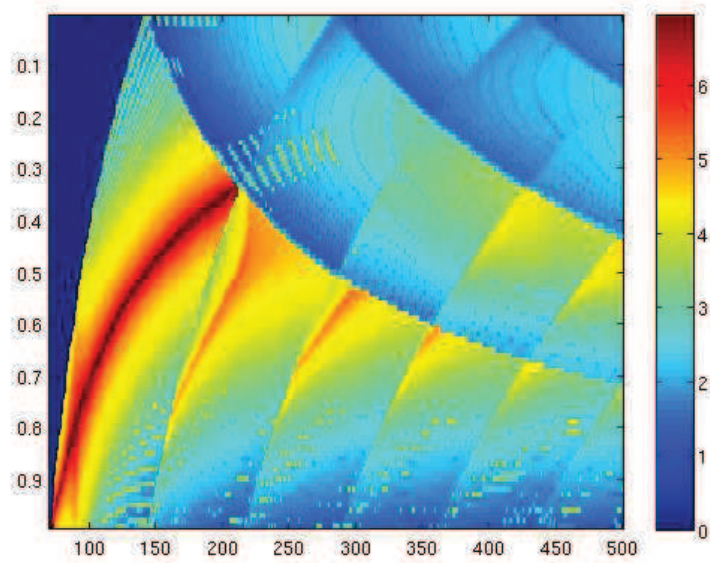


FIGURE 4.11 – Evolution de la profondeur de champ (DOF) en fonction du pitch et de la valeur de σ pour un dipôle 10° , $\sigma_{in/out} = \sigma \pm 0.01$, et $CD = 45nm$.

de formation de l'image change à différents focus. Cette formation a lieu sur le trait rouge du graphique, dont la position varie en fonction des ordres captés et du focus. Le fait que cela induise une amélioration ou une détérioration n'est pas prédictible, mais induit nécessairement un changement. Ce changement est à l'origine des variations de profondeur de champ aux limites de captation des ordres dont les relations sont définies dans les équations (4.6), (4.7), (4.8) et (4.9). Il en va de même pour les variations de pente. Chaque raie captée joue un rôle dans la formation de l'image. Cette dernière, et donc la pente associée, change en fonction du nombre d'ordres captés. Il est également noté que pour le cas simple de deux rayons ponctuels, le maximum de profondeur de champ est obtenu lorsque les raies de diffractions sont symétriques. C'est par exemple le cas lorsque seuls les rayons 0 et +1 sont captés et que ces deux derniers arrivent sur la pupille à égale distance du centre. Dans ce cas la relation tracée en rouge sur le graphique 4.10 s'exprime :

$$\frac{1}{\hat{p}} = 2 * \sigma \quad (4.10)$$

Elle peut se réécrire :

$$p_{optimal} = \frac{\lambda}{2.NA.\sigma} \quad (4.11)$$

Ce cas est similaire au cas décrit par le schéma 4.6.

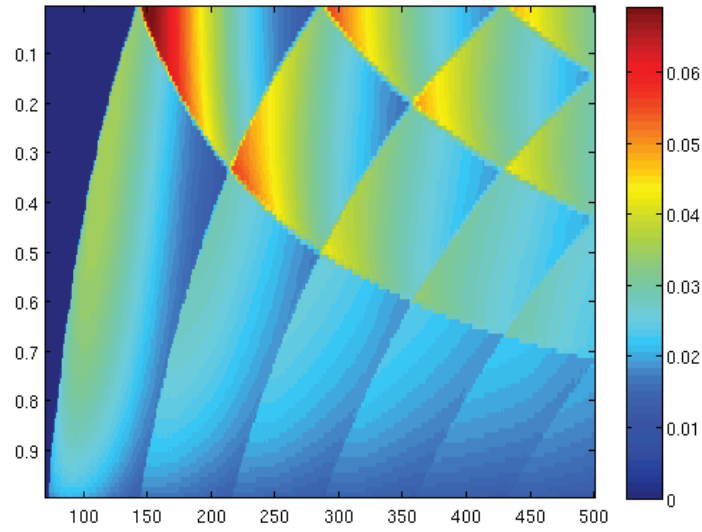


FIGURE 4.12 – Evolution de la pente maximale de l'image aérienne en fonction du pitch et de la valeur de σ pour un dipôle 10° , $\sigma_{in/out} = \sigma \pm 0.01$, et $CD = 45nm$.

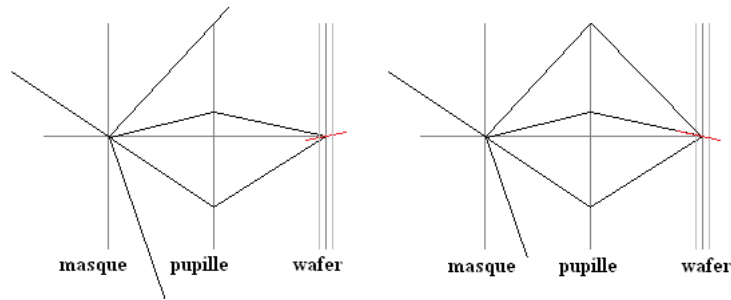


FIGURE 4.13 – Evolution du point de formation de l'image à travers le focus, en fonction du nombre de raies captées par la pupille. Il est notable que ce point change ici si l'ordre +2 est capté ou non.

Un approche similaire peut être réalisée pour étudier l'impact des valeurs définissant une source sur la profondeur de champs et sur la pente de l'image aérienne, en faisant varier ces valeurs avec la valeur du pas de réseau. L'exemple de la valeur du σ_{mean} d'une source annulaire est par exemple étudiée sur les graphiques 4.14 et 4.15. En somme, ces différentes études montrent l'importance du choix de la source, que ce soit au niveau de sa forme ou des valeurs qui la caractérisent. En effet, chaque type et forme de motif va donner des résultats différents en terme de profondeur de champ, de pente, ou de process window, en fonction de la source utilisée. Il existe

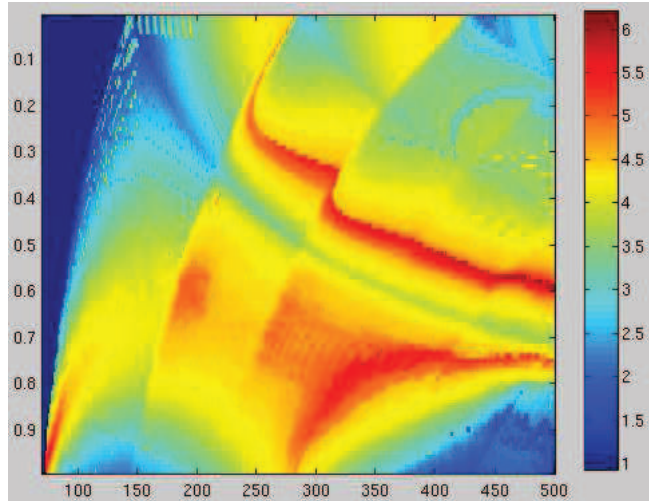


FIGURE 4.14 – Evolution de la profondeur de champs pour un réseau périodique de $CD = 45nm$ en fonction de la valeur du pas et de la valeur de σ_{mean} . $\sigma_{in} = \sigma_{mean} - 0.01$ et $\sigma_{out} = \sigma_{mean} + 0.01$

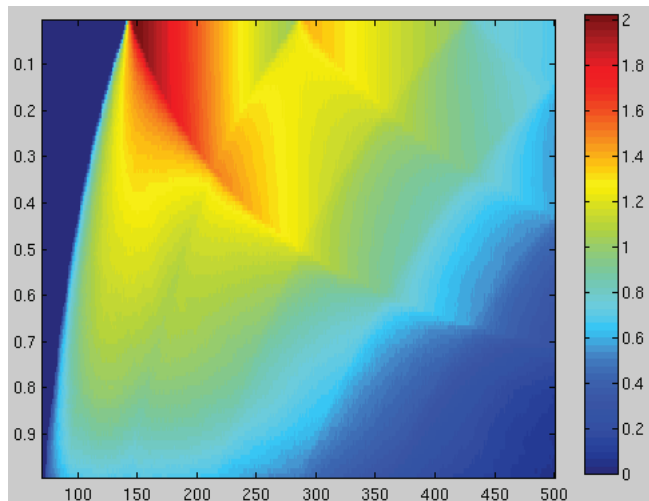


FIGURE 4.15 – Evolution de la pente de l'image aérienne NIS pour un réseau périodique de $CD = 45nm$ en fonction de la valeur du pas et de la valeur de σ_{mean} .

donc pour chaque structure une source optimale permettant d'obtenir les meilleurs résultats lors de la lithographie. La notion d'optimisation de la source englobe tout le processus de sélection et de caractérisation d'une source optimale pour un motif ou un ensemble de motifs donné.

4.1.3 Symétrie de la source

Pour finir, si la source peut prendre différentes formes quelconques, il est intéressant de se pencher sur la symétrie de cette dernière. En effet, toutes les sources étudiées dans la section précédente, sauf le dipôle, ont une symétrie de groupe diédral D_4 , dites généralement symétrie D_4 . Ces sources possèdent 4 axes de symétrie de réflexion (et 4 symétries de rotation) situés en $x = 0$, $y = 0$, $x = y$ et $x = -y$. La source dipôle possède quant à elle une symétrie D_2 , soit deux axes de symétrie de réflexion (et deux de rotation) situés en $x = 0$ et $y = 0$.

La nécessité de cette symétrie D_2 s'explique graphiquement. En étudiant le graphique 4.16, il est à noter que lors de l'exposition hors-axe, l'image formée ne s'effectue pas à l'endroit souhaité. Il est alors possible de compenser cet effet en ajoutant une source symétrique à la première.

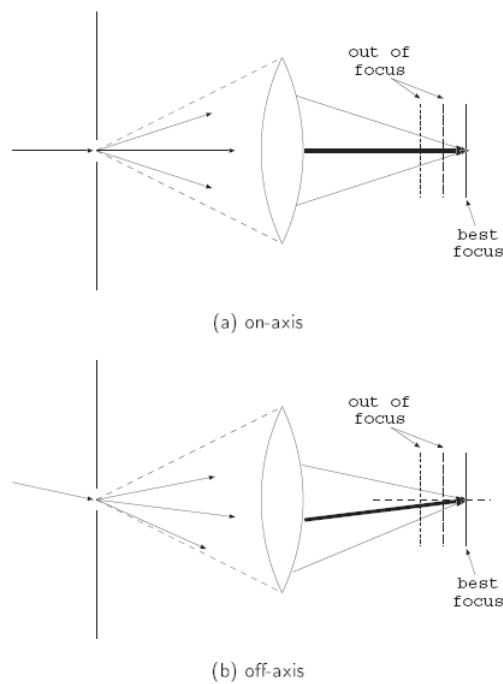


FIGURE 4.16 – Le centre de l'image formée par un rayon hors-axe va bouger pour des valeurs de focus non optimales et ainsi déplacer l'image aérienne, dégradant ainsi la profondeur de champ.

Les motifs étudiés en photolithographie étant uniquement verticaux et horizontaux, la source doit en conséquence posséder une symétrie verticale et horizontale. De plus, sur les masques industriels, de nombreux motifs sont reproduits avec une symétrie de rotation C_4 , soit des rotations de 90° , 180° et 270° . Il est alors nécessaire que les sources possèdent une symétrie D_4 qui inclut la symétrie C_4 .

4.2 Optimisation de la source par SMO interne

4.2.1 Méthode analytique

Dans le cadre de ce travail, différents logiciels industriels ont permis de générer des sources optimisées pour différents type de structures et de technologies. Généralement, les sources obtenues par les logiciels industriels sont comparées à une source simple annulaire, générée sans considération du motif souhaité. De même, dans le milieu de l'industrie, les sources utilisées sont parfois simplement gardées d'une génération de technologie à une autre. Dans de tels cas, il devient très facile de démontrer que les logiciels industriels apportent un gain quant à la source précédemment utilisée et non optimisée. Afin d'éviter un tel raccourci dans la démonstration de l'efficacité de la méthode, il est nécessaire d'établir une base repère au regard de laquelle les sources obtenues en SMO seront confrontées.

Pour ce faire, et afin de mieux comprendre le fonctionnement de la technique d'optimisation de la source, un outil d'optimisation de source a été développé dans le cadre de cette thèse : la SMO interne.

Un tel logiciel a été utilisé dans de nombreux cas : lors de la définition de nouvelles sources pour de nouvelles technologies ou pour comparer les résultats obtenus avec des logiciels industriels.

Une telle base se devait de prendre en compte les motifs à réaliser, tout en restant simple et reproductible. La solution devait être indépendante du procédé lithographique et donc ne pas être réalisée par une méthode itérative comme dans le cas de la génération de la source par les logiciels industriels.

Un moyen de générer une source optimisée a été défini afin de répondre à ces contraintes.

En effet, la valeur de σ optimale pour un pas de réseau donné ne dépendant pas de la taille du CD (cf. équation 4.11), il est possible pour un motif comprenant un seul pas de définir la source idéale comme étant un dipôle de valeur de σ spécifique. Il est également à noter que dans le cas d'un motif 1D, la source est obtenue en une dimension. Ainsi, pour un motif défini sur x dans le plan du masque (x, y) , la source est invariante en fonction de g (l'axe des ordonnées dans le plan (f, g) de la pupille de sortie donc dans le plan de la source effective) et inversement. Dans le cas de y invariant, la méthode de SMO interne va générer une source définie par deux bandes sur g telles que l'illustre la figure 4.17.

En supposant qu'un autre motif doit être réalisé avec cette même source, en prenant un motif défini sur y , invariant selon x , alors une nouvelle source peut être tracée de la même façon et représentée sur la figure 4.18.

La méthode SMO interne permet également de générer des sources pour des ensembles de motifs. Ainsi, la source permettant de générer trois motifs, deux sur x et un sur y peut donc être représentée simplement comme étant la somme des trois sources qui découlent de chacun de ces motifs. La représentation en est faite sur le graphique 4.19.

La méthode proposée ici consiste à mesurer les différents pitch qui composent le design à représenter puis à associer à chacun d'eux une valeur σ . Cependant, en effec-

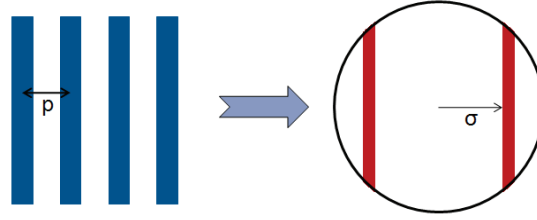


FIGURE 4.17 – Illustration du principe de génération d'une source simple avec un pitch unique p_1 . On utilise l'équation $\sigma = \frac{\lambda}{2 NA p}$ pour obtenir la valeur approprié du sigma associé à ce pitch.

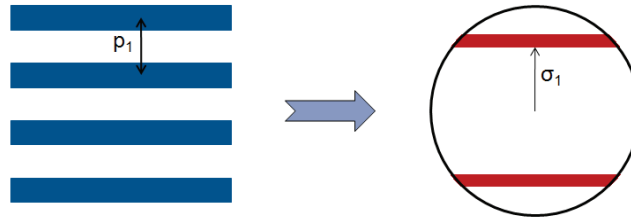


FIGURE 4.18 – Illustration du principe de génération d'une source simple avec un pitch unique sur l'axe y

tuant uniquement la somme des différents pitches, plusieurs limitations apparaissent. Pour mettre en lumière ces limitations, il est possible de considérer deux pitch. L'un très agressif va donner une paire de raies avec une valeur de σ élevée. Un second très relâché va donner une valeur de σ très faible.

Après diffraction et pour chaque raie de lumière définie par la méthode SMO interne, les extrémités des raies diffractées ne sont pas captées par la pupille pour les ordres de diffractions supérieurs à 1. Ces extrémités sont donc inutiles à la résolution des motifs et dégradent la qualité de la lithographie. Il est donc nécessaire que leur intensité relative soit faible.

De plus, les zones les plus à l'extérieur de la source correspondent aux pitches les plus agressifs. Ces derniers étant les plus critiques lors de l'étape de lithographie, il est important que ces derniers soient alors pondérés avec une plus grande valeur d'intensité.

Afin de limiter ces deux effets, les sources regroupant les composantes verticales et horizontales ont été convoluées avec une fonction particulière afin de pondérer leurs intensités en adéquation avec les règles énoncées ci-dessus. Cette fonction est définie par le polynôme de Zernike d'ordre $n = 2$; $m = 2$, stipulée comme suit et représentée sur la figure 4.20.

$$Z_n^m(\rho, \phi) = R_n^m(\rho) \cos(m\phi) \quad (4.12)$$

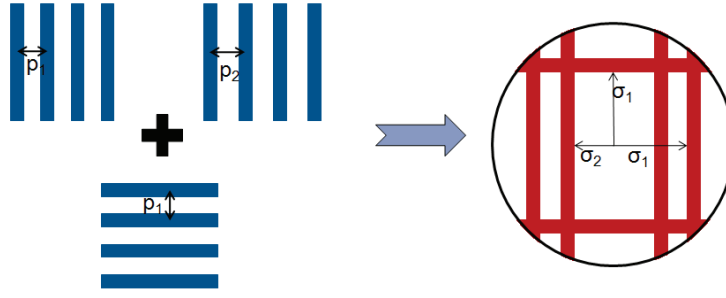


FIGURE 4.19 – Illustration du principe de génération d'une source simple avec une somme de trois motifs.

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k!((n+m)/2-k)!(n-m)/2-k)!} \rho^{n-2k}$$

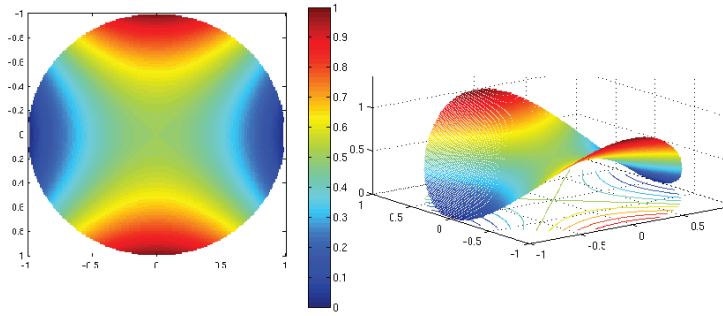


FIGURE 4.20 – Polynôme de Zernike d'ordre $n = 2$ et $m = 2$. Il est également référencé en optique comme le cinquième mode, ou "astigmatisme à 0°".

De plus, un poids est donné à chaque contribution d'un pitch proportionnellement au nombre de fois où celui-ci est présent dans le design ainsi qu'en fonction de la longueur moyenne des pitches. Enfin le polynôme de Zernike ayant son intensité comprise entre -1 et 1 , il sera pondéré afin d'être borné entre 0 et 1 , dans le but d'éviter d'obtenir des contributions négatives. Il en découle une écriture possible de la génération de la source :

$$\begin{aligned} src = & (0.5 + Z_2^2/2) * \sum_{pitch} (contrib_h(pitch) * nombre(pitch) * L_{moy}(pitch)) \\ & + (0.5 - Z_2^2/2) * \sum_{pitch} (contrib_v(pitch) * nombre(pitch) * L_{moy}(pitch)) \end{aligned} \quad (4.13)$$

avec $contrib_h$ et $contrib_v$ les contributions horizontales et verticales pour un pitch donné.

L'un des problèmes rencontrés lors de l'utilisation d'une telle source est que, pour une gamme de pitch trop importante, la source devient très étalée. La qualité des résultats de la lithographie est donc dégradée. Afin de limiter ce problème, les valeurs de la source les plus faibles ont été tronquées. Le meilleur ratio de remplissage de la source se situant aux alentours de 10%, la décision a été prise de tronquer afin que seul 10% de la source soit éclairé. Enfin, pour que la source soit plus réaliste, cette dernière est convoluée par une gaussienne d'écart type très faible.

Finalement, la technique de décomposition en polynôme de Zernike est utilisée pour obtenir une source paramétrique. Cette technique décrite par la suite dans le chapitre 5.2.2 permet de comparer deux sources pour obtenir une valeur unique représentant la différence de ces deux sources. Il est possible grâce à des algorithmes d'optimisation simple, tel que la régression quadratique, de trouver la source paramétrique la plus proche de la source obtenue à l'aide de la SMO interne.

La méthode d'obtention de la source peut être représentée par l'étude d'un exemple simple composé de divers pitches unidirectionnels, comme représenté sur le schéma 4.21. Cette façon de générer une nouvelle source est appelée SMO interne.

4.2.2 Méthode géométrique

Afin de simplifier la démarche de création de source lors de la définition d'une nouvelle technologie, un procédé bien plus accessible a été mis en place. En effet, lors des premières étapes de la définition d'une technologie, la forme finale des motifs n'est pas encore parfaitement définie. Il est donc impossible de générer une source par l'intermédiaire des outils industriels, comme par l'intermédiaire de la méthode de SMO interne, basée sur un ensemble de motifs tirés du design.

Au cours des premières étapes de la création d'une nouvelle génération, chaque niveau de cette technologie, appelé "layer", est défini en amont par les valeurs de MRC, de l'anglais Mask Rule Check. Les MRC représentent l'ensemble des dimensions critiques qu'il est possible de trouver sur le design final. Pour exemple, les différents pitches qui seront présents sur le masque, les tailles des motifs critiques en deux dimensions etc.... La quantité d'informations donnée en général est relativement faible puisque seules quelques valeurs de pitch sont déterminées.

A partir de ces informations, il est possible de dessiner une première carte d'intensité pour la source lumineuse et d'étudier l'image de diffraction dans le plan de la pupille. Cette image va permettre de représenter l'ensemble des ordres de diffraction captés par la pupille de sortie.

Afin d'étudier cette diffraction pour un certain niveau d'une nouvelle technologie, il est possible de représenter cette dernière à travers les pas de réseau donnés par les caractéristiques de cet ensemble technologie/niveau. La source idéale devrait répondre au critère suivant : l'ensemble des images de diffraction produites par toutes les structures étudiées doivent se recouvrir. En effet, comme vu dans la section 4.1.1, ce critère définit le contraste, donc la pente de l'intensité lumineuse au niveau de la résine et par conséquent la qualité de l'image finale obtenue sur le wafer.

Pour exemple, le cas d'un niveau technologique imaginaire répondant aux critères suivants peut être étudié. Le masque final possèdera :

- Une grande quantité de structures de type lignes espaces avec un pas de réseau de 90nm dans le sens vertical.
- Un ensemble de structures lignes espaces verticales ayant un pitch de 180nm.
- Des structures ligne espace de pitch 130nm dans le sens horizontal.

Une source imaginaire peut être utilisée répondant aux critères suivants :

- Type paramétrique
- Composé d'un dipôle vertical $\sigma_{in} = 0.5$, $\sigma_{out} = 0.6$ et $\text{angle d'ouverture} = 45^\circ$
- Possédant un dipôle horizontal $\sigma_{in} = 0.8$, $\sigma_{out} = 0.9$ et $\text{angle d'ouverture} = 30^\circ$

L'ensemble des trois structures va donner trois figures de diffraction différentes qui se superposent sur le plan de la pupille comme représenté dans la figure 4.24. Une source parfaitement adaptée à la technologie étudiée aurait vu toutes les images de diffraction des ordres nuls et non nuls se recouvrant les unes les autres. Ce n'est ici pas le cas.

En définissant une nouvelle source répondant aux critères suivants :

- Type Paramétrique
- Un dipôle horizontal $\sigma_{in} = 0.7$, $\sigma_{out} = 0.9$ et $\text{angle d'ouverture} = 35^\circ$
- Un dipôle vertical $\sigma_{in} = 0.45$, $\sigma_{out} = 0.55$ et $\text{angle d'ouverture} = 30^\circ$

la figure de diffraction représentée sur l'image 4.25 permet de constater que les images diffractées se recouvrent. De meilleurs résultats sont attendus, améliorations corroborées par les simulations présentées dans la figure 4.26.

La partie 4.1 permet d'expliquer la raison d'un gain en contraste et donc en latitude d'exposition lorsque les aires se recouvrent. En plus de cela, il est possible de vérifier que lorsque les pôles opposés d'un même dipôle se recouvrent pour les ordres de diffraction zéro et plus ou moins un, la profondeur de champ est également maximale. En effet, la figure de diffraction de l'ordre 1 étant décalée de la valeur $\frac{1}{p}$, si elle recouvre le pôle opposé distant d'une valeur 2σ , alors la formule du σ optimal 4.10 est retrouvée. Les deux valeurs étant alors égales, il est possible d'écrire :

$$\frac{1}{p} = 2\sigma$$

Il en découle des valeurs de pitch et de σ optimales définies telles que :

$$p_{optimal} = \frac{\lambda}{2.NA.\sigma} \quad (4.14)$$

$$\sigma_{optimal} = \frac{\lambda}{2.NA.p} \quad (4.15)$$

Dans le cas où ces deux valeurs sont en adéquation, non seulement le contraste est maximal mais la profondeur de champ également.

Afin de trouver la source qui soit la plus adaptée pour cette technologie, il convient de trouver la source dont les images diffractées se recouvrent le plus possible. Celle-ci donnera à terme les meilleurs résultats en contraste, donc en latitude d'exposition, ainsi qu'en termes de profondeur de champ pour les valeurs des pitches privilégiés. Pitches sur lesquels sont basés cette étude, donnés pour les nouveaux niveaux technologiques.

Dans un premier temps, afin de se faire une première idée d'une source potentielle, un outil a été créé dans le cadre de ce travail. Cet outil permet d'obtenir facilement la représentation des images de diffraction dans le plan de la pupille, à l'aide des caractéristiques des principaux pitches d'une technologie naissante. Les images 4.25 et 4.24 ont ainsi été obtenues.

Ce support de recherche permet de réaliser une image de diffraction à partir d'une source déjà existante et des valeurs des pitches verticaux et horizontaux définissant la technologie. Une partie non négligeable du travail incombe alors à l'utilisateur qui doit trouver la ou les sources dont les images de diffractions se recouvrent au maximum. Ces sources peuvent être obtenues de différentes façons. Il est possible de s'inspirer de technologies déjà existantes afin d'optimiser une source. Il est également possible de récupérer des sources depuis des logiciels industriels ou depuis l'outil SMO interne. Il est finalement possible de s'inspirer de sources de partenariats économiques ou d'imaginer de nouvelles sources en se basant sur l'expérience de l'utilisateur.

Une seconde partie du travail consiste ensuite à tester chacune des sources candidates et à les optimiser afin de sélectionner la meilleure d'entre elles. Des simulations peuvent être réalisées pour chacune de ces sources dans le but d'étudier leur impact sur la fenêtre de procédé. L'outil de simulation Panoramic a ainsi permis de faire varier différents paramètres de la source, tels que les valeurs de σ , d'angle d'ouverture ou d'intensité. La mesure des valeurs de profondeur de champ, de pente, de taille de la fenêtre de procédé et de latitude d'exposition pour les différents pitches étudiés ont été mise en œuvre. Quelques exemples d'optimisation sont représentés sur le graphique 4.27.

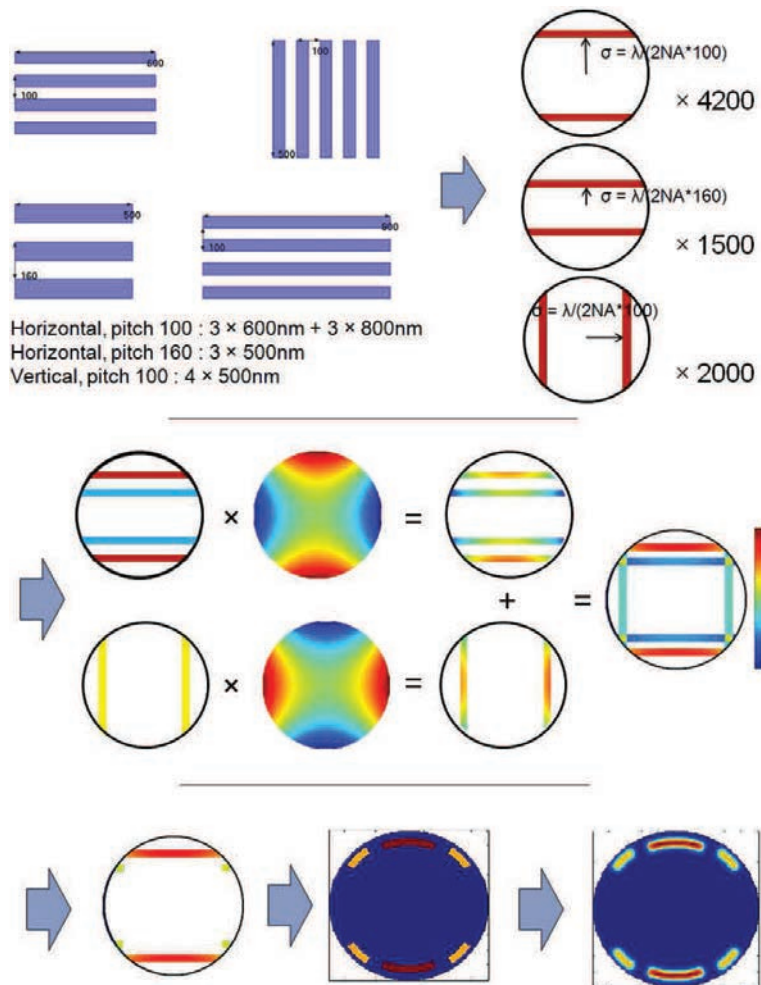


FIGURE 4.21 – Illustration du principe de génération de la source avec la méthode SMO interne.

Les différentes étapes sont ici représentées :

- Décompte des différents pitches ainsi que de leur longueur moyenne associée
- Génération des raies pour les σ associées
- Génération des sources verticales et horizontales, somme de différentes raies pondérées
- Convolution avec le polynôme de Zernike Z_2^2
- Somme des deux contributions verticale et horizontale
- Troncature pour n'avoir qu'un certain pourcentage de la source éclairée
- Trouver la source paramétrique la plus proche par méthode de régression quadratique sur la mesure de la différence. Cette mesure est effectuée avec la méthode de décomposition en polynôme de Zernike
- Convolution de la source par une gaussienne de faible écart type afin d'avoir une source finale réaliste.

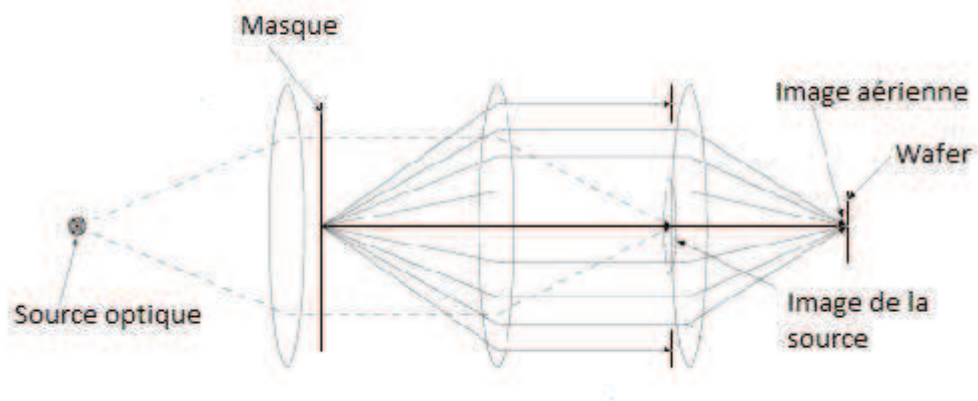


FIGURE 4.22 – Représentation du système de Köhler annexé.

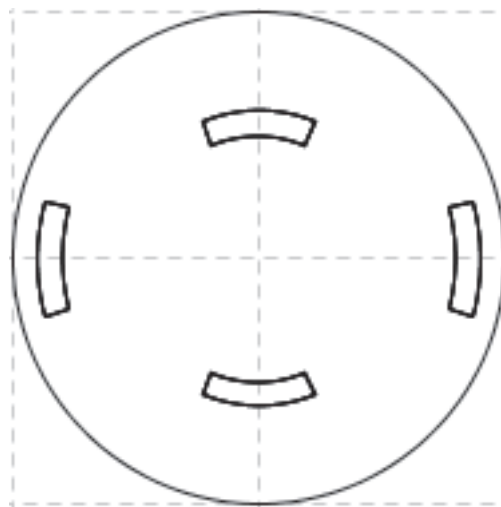


FIGURE 4.23 – Représentation des contours de la source utilisée.

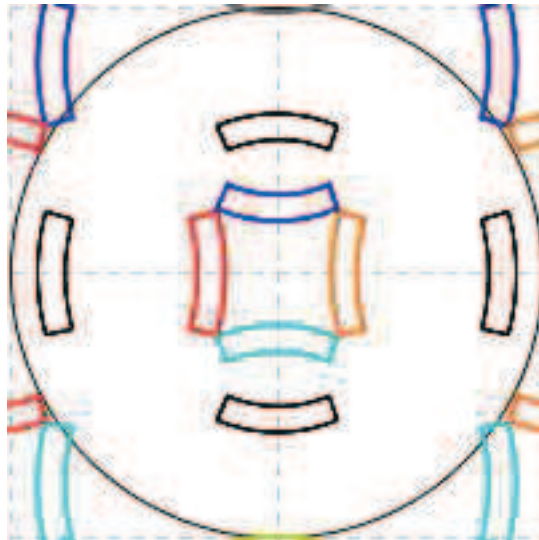


FIGURE 4.24 – Image de l'ensemble des images de diffraction par les différents pas de réseau présents sur la technologie étudiée.

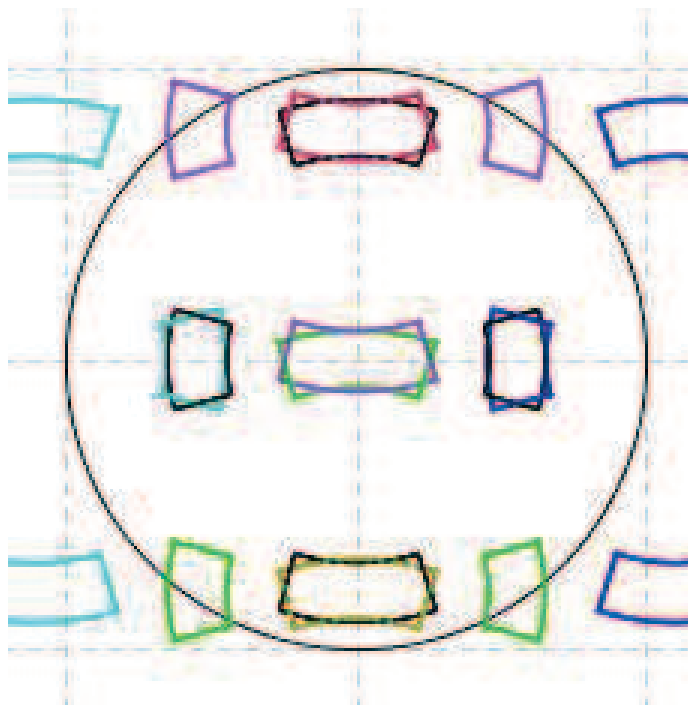


FIGURE 4.25 – Image de diffraction générée par les différents pas de réseau, avec la nouvelle source.

4.2. Optimisation de la source par SMO interne

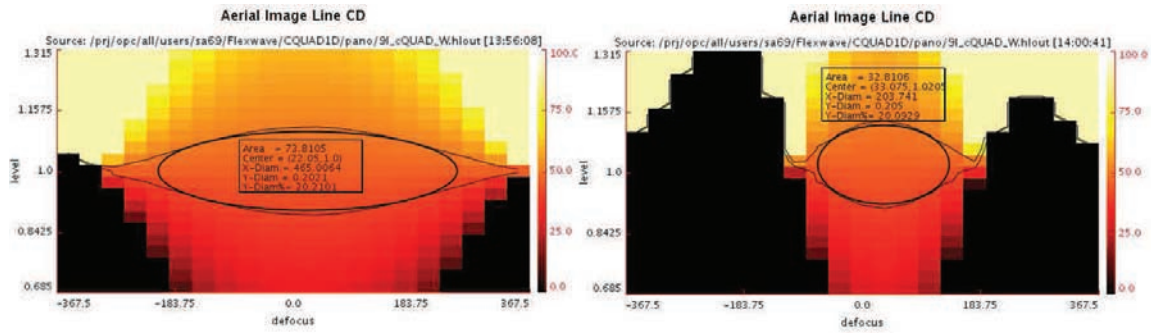


FIGURE 4.26 – Tracé de la fenêtre de procédée pour la nouvelle source (à gauche) et pour l'ancienne source (à droite). Une augmentation flagrante de la process window est constatée.

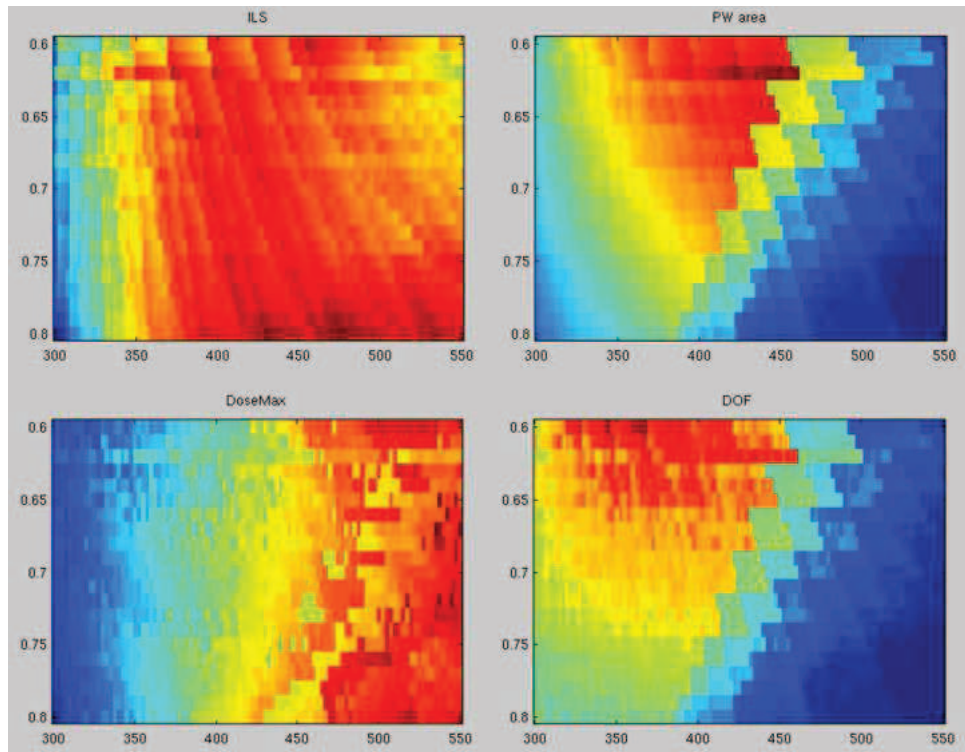


FIGURE 4.27 – Exemple d'une optimisation de la valeur de σ_{out} d'un pôle d'une source en fonction du pitch. L'image illustre la variation de pente (ILS), de process window, de variation maximale de dose et de profondeur de champ en fonction de la valeur de σ_{out} . Il est donc intéressant pour cette source particulière et pour des pitches compris entre 350nm et 450nm de prendre une valeur $\sigma_{out} = 0.62$. L'idée n'est pas de donner des résultats exacts mais d'illustrer la méthode d'optimisation.

4.3 Mise en pratique de l'optimisation de la source

Dans le cadre de cette thèse, chacune des différentes méthodes d'optimisation de source a pu être utilisée à de nombreuses reprises. Dans la section qui suit, l'étude d'un cas précis va être abordée afin de mieux comprendre la méthodologie utilisée pour cette optimisation. Ce processus d'optimisation est un processus standard mis en place au sein de l'entreprise STMicroelectronics dans le cadre d'un partenariat CIFRE.

4.3.1 Choix des structures d'optimisation des sources

Afin d'optimiser les sources, il est nécessaire dans un premier temps de savoir quels motifs sont à prendre en compte, quels seront les critères de validité de la source, ainsi que seront les contraintes définissant la source.

Dans cet exemple, la source a ainsi été contrainte à une symétrie D4 interdisant d'avoir des dipôles. De plus, le type de source peut être soit freeform soit paramétrique puisqu'aucune contrainte n'a été posée sur ce point.

Les structures permettant l'optimisation sont également définies en amont. Dans le cadre de l'exemple utilisé ici, ont été définies les structures selon différents critères. Chacune de ces structures est un extrait du design final présent sur le masque appelé crop dans le milieu industriel. Ces extraits dont la taille varie de 100nm de côté à plusieurs microns forment des rectangles dont les extrémités sont placées sur la grille de simulation. Chaque extrait contient une structure représentative du masque choisi selon différents critères. L'un des critères qui permet de sélectionner un motif peut être sa grande présence sur le masque, si ce dernier est répété, exactement ou avec peu de changements, un grand nombre de fois dans le design du masque. La criticité d'un motif est également un élément à prendre en compte lors du choix des motifs. Un motif critique difficile à imprimer sans la technique de SMO pourra être utilisé, non pas pour améliorer les résultats sur l'ensemble du masque, mais afin de mieux résoudre ce motif particulier. Si par exemple ce motif est limitant pour certaines conditions, son optimisation va permettre de supprimer ce critère limitant afin d'augmenter la fenêtre de procédé. Ce genre d'optimisation se fera souvent au détriment d'autres critères, tel que la taille des pv-band des autres structures moins critiques. En effet, la source utilisée n'est alors pas optimisée pour ces autres structures. Enfin, un ensemble de structures simples peut être utilisé, résumant l'ensemble du masque. Il est par exemple possible de prendre des structures test de type ligne/espace possédant les dimensions critiques les plus représentées. De manière identique, certaines structures en deux dimensions peuvent être utilisées pour générer la nouvelle source. Certaines de ces structures sont représentées sur l'image 4.28. Les critères de validité préconisés sont définis par plusieurs paramètres. Dans un premier temps, l'augmentation de la profondeur de champ est primordiale. Des simulations et des mesures sur la profondeur de champ seront réalisées au niveau des structures utilisées lors du procédé d'optimisation de la source. S'il est important

d'améliorer les résultats sur ces structures particulières, il est tout aussi important de ne pas dégrader le reste des résultats. Des tests seront donc réalisés sur d'autres structures afin de vérifier que ces dernières ne seront pas dégradées par la modification de la source lumineuse.

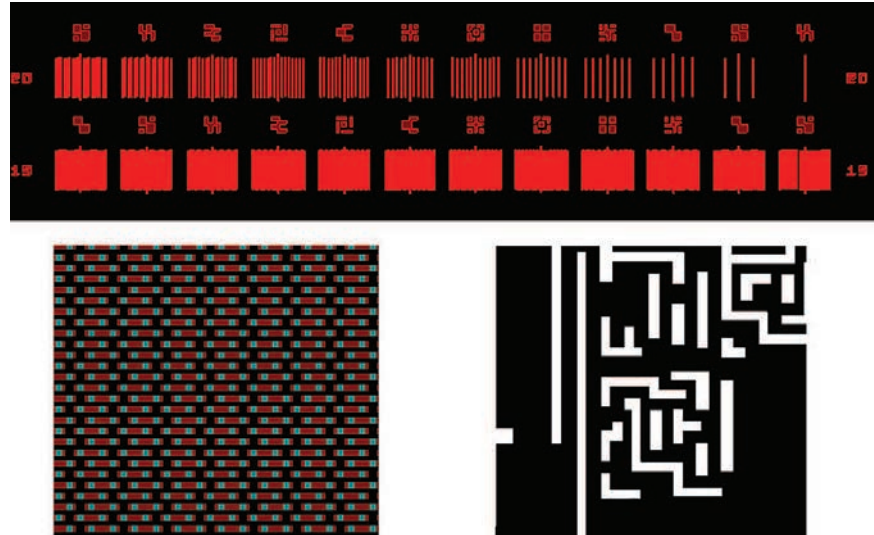


FIGURE 4.28 – Exemples de structures utilisées lors de l'optimisation de la source. Les structures ne sont pas aux mêmes échelles mais permettent un aperçu du type de structure utiliser. On retrouve des structures périodiques 1D, des structures périodiques 2D ainsi que des structures de logiques difficiles à résoudre, appelées hot spot.

4.3.2 Les sources Optimisées par simulation

L'optimisation se déroule en plusieurs étapes qui procèdent par éliminations successives des sources ne répondant pas aux attentes. Ainsi, une première étape du processus consiste à utiliser les différentes méthodes d'obtention des sources optimisées afin de sélectionner la meilleure d'entre elles.

Une première étape a donc été réalisée par l'intermédiaire des logiciels industriels Brion et Mentor Graphics, afin de créer une première série de sources freeform et paramétrique. Les techniques d'obtention de ces sources ainsi que les différences entre ces dernières ne seront pas développées ici et seuls les résultats seront présentés.

D'un autre côté, le logiciel interne ST a pu être mis en place sur les mêmes structures que décrit précédemment. Les différents pas de réseau présents dans les designs étudiés ont été extraits à l'aide d'un logiciel développé à cet effet. A l'aide de ces différents pas, la technique décrite dans la partie 4.2 a été utilisée, de sorte que différentes sources puissent être générées. Par une opération de régression quadratique,

cette source a été transformée en une source paramétrique dont les résultats ajoutés aux sources à tester sont représentés sur le graphique 4.29.

Cette génération de sources multiples offre un panel de résultats assez large, chacune de ces sources ayant été réalisée avec un logiciel différent, une méthode spécifique ou des réglages distincts. Si chacune de ces sources reste optimisée et utilisable, en pratique une seule doit être choisie pour être utilisée en production. Un processus d'élimination a donc été mis en place afin de n'en garder qu'une seule. Chacune des structures est ainsi simulée pour chacune de ces sources à différentes conditions de dose et de focus. L'overlapping process window est comparé pour chacune de ces dernières. De la même façon, le MEEF de chacun des cas est simulé et comparé.

Il est également possible d'étudier la taille des pv-band pour différentes valeurs de pitch avec les sources sélectionnées telles que représentées sur la figure 4.30.

Les résultats des simulations pour les valeurs de DOF sur l'ensemble des structures test ainsi que les valeurs de MEEF sont représentées dans le tableau 4.29. La provenance des sources n'est pas spécifiée afin de ne pas considérer ce tableau comme un benchmark des différentes solutions. A l'aide de ces résultats, il apparait que seules certaines sources présentent un avantage et améliorent réellement les résultats, tant en profondeur de champ que en MEEF. Seules ces sources seront étudiées par la suite.

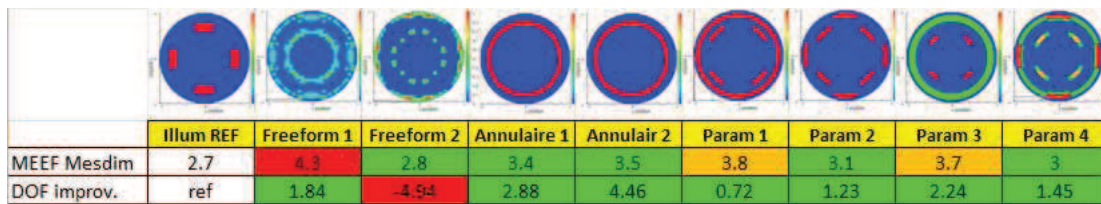


FIGURE 4.29 – Exemples de structures utilisées lors de l'optimisation de la source. Les structures ne sont pas aux mêmes échelles mais permettent un aperçu du type de structure utiliser. On retrouve des structures périodiques 1D, des structures périodiques 2D ainsi que des structures de logiques difficiles à résoudre, appelées hot spot.

4.3.3 Résultats mesurées

Afin de départager les sources, il sera toutefois nécessaire d'effectuer des tests sur plaques. Après avoir sélectionné les trois meilleurs candidats, des plaques de type FEM (où chaque puce est réalisée avec des valeurs de doses et de focus différentes) sont réalisées sur le scanner. A l'aide de mesure SEM, les valeurs de profondeur de champs sont obtenues pour différentes structures à une dimension ainsi que pour différents points critiques utilisés lors de la génération des sources. Les résultats des mesures pour quelques-uns de ces points sont visibles sur les figures 4.31 et 4.32. L'ensemble des résultats est résumé sur le tableau 4.33.

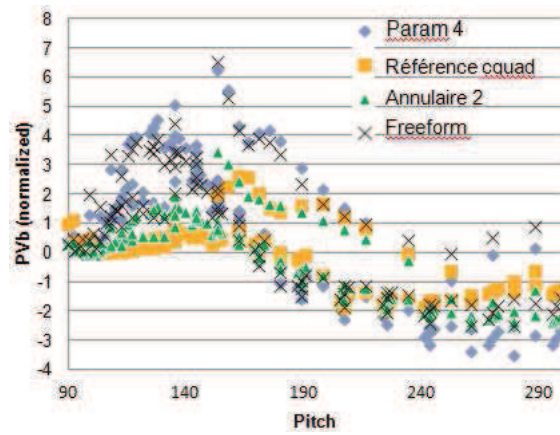


FIGURE 4.30 – Variation des pvband normalisées en fonction du pitch pour différentes sources.

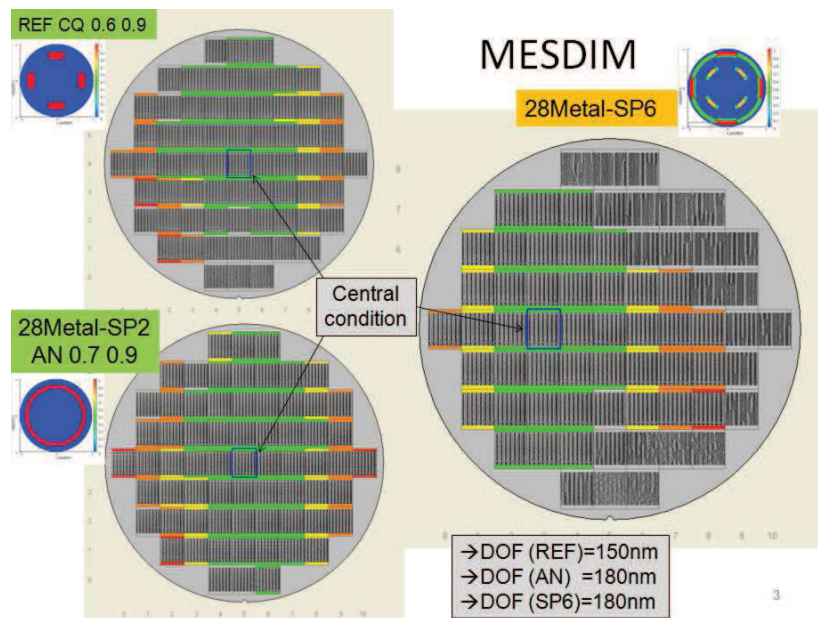


FIGURE 4.31 – Résultats des mesures SEM sur les structures de type Mesdim pour les trois sources sélectionnées : l'annulaire 2 et les paramétriques 3 et 4.

A la lumière de ces différents éléments de simulations et de mesures, il est possible de sélectionner la source donnant les meilleurs résultats : la source Annulaire 2. Dans le cadre de cette thèse, plusieurs sources ont été réalisées et optimisées pour différents niveaux de technologies déjà existants ou en développement, en s'appuyant sur les techniques décrites dans ce chapitre.

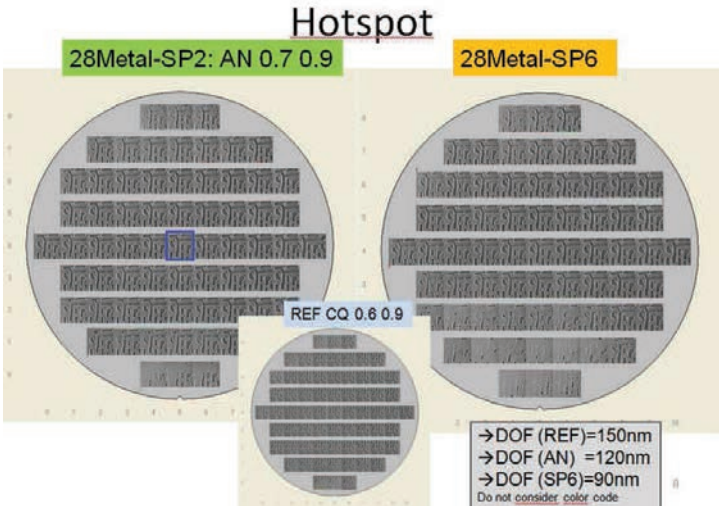


FIGURE 4.32 – Résultats des mesures SEM sur le second hotspot.

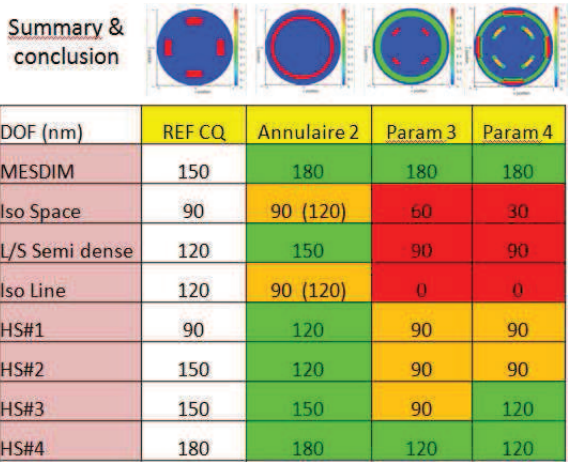


FIGURE 4.33 – Résumé des résultats SEM pour différentes structures exposées avec différentes sources. La source annulaire offre les meilleurs résultats est donc sélectionnée.

Chapitre 5

Source générée et stabilité

La technique d'optimisation de la source permet théoriquement une amélioration de la fenêtre de procédé ainsi que des différents critères de mesures, tel que démontré dans les précédents chapitres. Cependant, lors de la mise en pratique d'une telle méthode, différents aspects techniques restent à étudier. En effet, si la génération d'une source lumineuse dans le scanner pour des sources simple est quelque chose de connu, la génération de source complexe optimisée n'a jusqu'à présent jamais été étudié. Le système Flexray permettant l'obtention de telles sources est en effet un appareil nouveau, et les limites de sa mise en application au sein d'une salle blanche de production doit être étudié.

Différentes approches ont alors été développer durant cette thèse, et sont présenter dans ce chapitre.

5.1 Les différences entre les sources théoriques et les sources mesurées

Si le système Flexray possède de nombreux avantages, il est également intéressant d'étudier ses limites. En effet, bien que cet outil soit annoncé comme étant plus performant que les DOE, cela reste un produit très jeune et il est nécessaire de vérifier que ce produit répond bien à nos attentes, apportant les avantages escomptés sans pour autant engendrer de nouveaux problèmes.

Les premières mesures de sources générées par Flexray ont été réalisées durant cette thèse. Il est rapidement apparu que, à l'instar des DOE, les sources générées possédaient toujours une légère différence vis à vis des sources théoriques demandées. Ces différences s'expliquent assez facilement d'un point de vue physique. Par exemple, s'il est aisé par le biais de l'informatique de créer des transitions d'intensité lumineuse très brèves et de faire varier l'intensité de 0 à 1 entre deux pixels adjacents, il est physiquement presque impossible de réaliser une telle opération.

L'analyse à l'œil nu de ces différences est assez simple (cf. figure 5.1). En effet, les deux sources sont sensiblement identiques, mais sur la source mesurée un bruit de fond

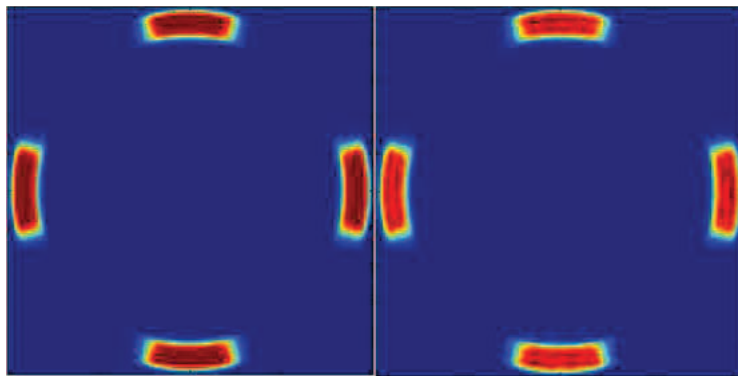


FIGURE 5.1 – Exemple de différence entre une source théorique à gauche et une source mesurée à droite : apparition de pixels lumineux sur les pôles.

est notable. De plus, les pixels de la matrice Flexray peuvent apparaître à certains endroits.

Cependant, si cette analyse visuelle est assez facile, elle n'a pas une grande portée scientifique. Dire "la source est différente à l'œil nu" n'est pas très pertinent. Dans le cadre du travail réalisé, la création d'un moyen mathématique adapté, permettant de quantifier la différence entre deux sources, est apparue nécessaire.

5.2 Etude des erreurs induites par la génération de la source

5.2.1 Méthode du DeltaCD et PVband

La première méthode de comparaison de source est une méthode indirecte qui consiste à simuler l'impact de chaque source sur l'image aérienne et/ou l'image résine en modifiant la source dans la partie optique du modèle.

Avec l'utilisation des DOE, la source restait jusqu'à présent fixe. Les acteurs de la lithographie savaient qu'une différence entre la source théorique et la source mesurée existait. Cependant, ces deux sources étant fixes, cette différence ne variait jamais. Il suffisait donc de mesurer une unique fois la source réelle et de l'incorporer au modèle optique pour s'affranchir des problèmes liés à cette différence.

Avec l'outil Flexray, un nouveau problème apparaît. Entre deux expositions d'un même niveau de technologie, donc utilisant la même source optique, si une autre source est utilisée les micro-miroirs vont bouger, dans un premier temps pour créer la source différente, puis dans un second temps afin de revenir à leur état initial. Lors de ce mouvement, il est possible qu'un ou plusieurs miroirs ne reviennent pas exactement à la même place. Dans ce cas, les deux sources, qui pourtant devraient être identiques, peuvent présenter des différences. La mise en œuvre de la méthodologie utilisée avec les DOE qui consiste à mesurer la source une fois et à l'introduire dans le modèle optique est impossible. Dans le cas de l'utilisation du module Flexray, chaque source mesurée peut être différente des autres sources, sensées être identiques.

La nouvelle méthode introduite est donc basée sur le fait qu'il est possible de prévoir que chaque source différente va créer une image aérienne différente ainsi qu'une image résine différente. Une série de motifs à une et deux dimensions définis arbitrairement a été créée, afin d'étudier de telles variations des images aérienne et résine. Ces motifs sont sensés représenter les différents design types susceptibles d'être présents sur le masque. Ils peuvent être différents d'une technologie à l'autre.

Une fois cet ensemble de structures généré, la mesure de l'impact d'une variation de source par simulation est possible. Cette variation peut se manifester soit en termes de variation de CD, soit en termes d'impact sur la fenêtre de procédé. Afin de faciliter la lecture des résultats obtenus, la fenêtre de procédé n'est pas représentée directement. A la place de cette dernière, les pvbands sont simulées afin de comparer l'impact d'une source par rapport à une autre.

Cette technique rapide à mettre en place est basée sur des simulations simples à effectuer et permet de prévoir l'impact d'une modification de la source sur la qualité de la lithographie. Le fait de baser les résultats sur les pv-bands et non sur la fenêtre de procédé permet une visualisation plus directe de cet impact. L'étude de la variation de CD aux meilleures conditions d'exposition complète ces résultats.

Afin de mesurer l'impact de cette source, une source complexe de type Freeform a été mesurée et comparée à la source théorique. Plusieurs structures à une ou deux dimensions ont été simulées avec les deux sources et les résultats sont illustrés sur la

figure 5.2. Les spécifications limites fournies par le fournisseur du scanner en rouge étant largement supérieures aux valeurs maximales mesurées, il est possible de conclure que les différences entre les sources théoriques et mesurées n'impactent que très peu la qualité des résultats. Cet impact est d'autre part parfaitement pris en compte dans les spécifications du constructeur.

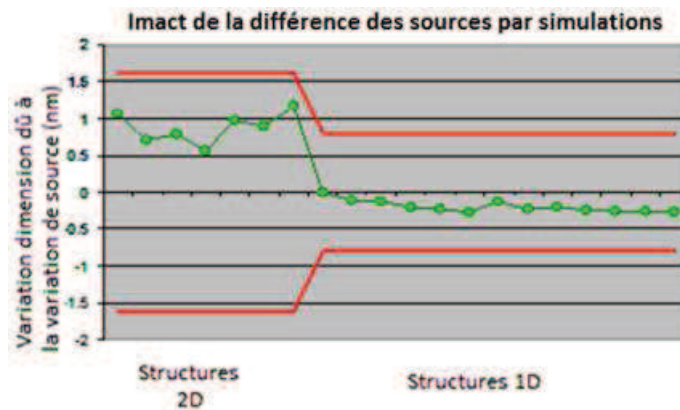


FIGURE 5.2 – Impact de la différence entre une source mesurée et une source théorique sur la dimension critique de plusieurs structures test. Les différences en simulations sont tracées ici et sont largement inférieures aux spécifications données par le constructeur ASML.

Il est également possible de simuler la fenêtre de procédé induite par les structures tests présentées ci-dessus (et non listées car jugées impertinentes) pour la source Freeform générée par le module Flexray et mesurée. Dans un même temps, un DOE est fabriqué afin de créer la même source freeform sans l'outil Flexray. De même, cette source est mesurée et la fenêtre de procédé simulée grâce à cette mesure. Les deux résultats sont comparés en courbe EL-DOF sur la figure 5.3. Il apparaît à la vue de ces courbes que l'impact sur la source générée par Flexray n'est pas plus important que celui induit par les éléments optiques diffractant DOE.

5.2.2 Méthode par décomposition en polynôme de Zernike.

Si la méthode basée sur la variation de CD et de pv-bands permet de mesurer concrètement l'impact de la modification d'une source pour une technologie donnée, il est parfois intéressant de se détacher de l'unicité de la technologie. Il est possible de mesurer ainsi la modification d'une source générée par le scanner indépendamment des facteurs extérieurs à la source tels les motifs étudiés, les conditions de procédé utilisées etc... De plus, malgré l'avantage de la précision de la méthode ΔCD au regard d'un niveau de technologie donné, les informations utiles quant à l'état général du scanner sont manquantes.

Afin de compléter la méthode ΔCD , une seconde méthode de quantification de la

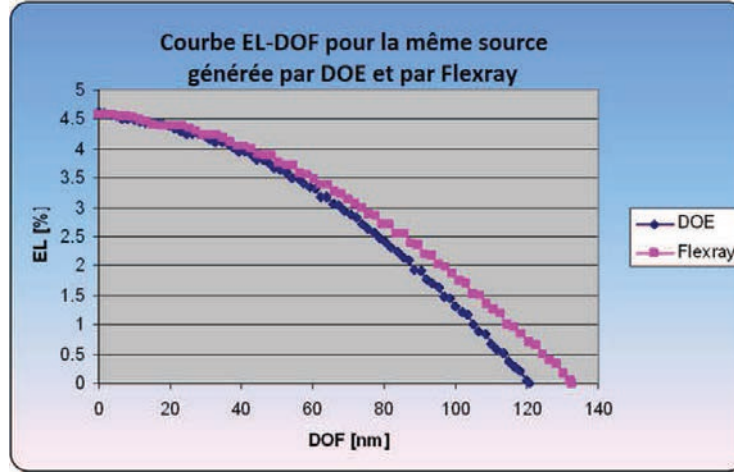


FIGURE 5.3 – Courbe de la variation de la latitude d’exposition en fonction de la profondeur de champ lors de l’utilisation dans le modèle optique d’une même source freeform mesurée mais générée une fois avec un élément optique diffractant (DOE) et une fois avec le module Flexray. L’impact de la différence entre la source théorique et la source mesurée en sortie du module Flexray est donc du même ordre de grandeur que lors de l’utilisation d’un DOE, c’est à dire quasiment négligeable.

différence de la source a été mise en place. Cette méthode est basée sur un principe mathématique énonçant que toute fonction définie dans un espace donné peut être décomposée en une somme unique et infinie de polynômes si ces derniers sont orthogonaux et définis dans le même espace que ladite fonction. Les sources optiques telles qu’utilisées en lithographie sont définies dans l’espace du disque unitaire. Il est donc possible d’utiliser les polynômes de Zernike, décrits par les équations 5.1, étant eux même orthogonaux et définis sur le disque unitaire.

$$\begin{aligned}
 Z_n^m(\rho, \theta) &= \sum_{s=0}^{n/2} \rho^{n-2s} R(s) & m = 0 \\
 Z_n^m(\rho, \theta) &= \sum_{s=0}^{n/2} \rho^{n-2s} R(s) \cos(m\theta) & m > 0 \\
 Z_n^m(\rho, \theta) &= \sum_{s=0}^{n/2} \rho^{n-2s} R(s) \sin(m\theta) & m < 0
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$R(s) = (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2-s} \right)! \left(\frac{n-|m|}{2-s} \right)!}$$

où les coefficients n et m représentent les ordres du polynôme de Zernike, avec n et m des nombres entiers, tels que $n + m$ paire et $-n \leq m \leq n$. Les premiers coefficients de Zernike sont représentés sur la figure 5.4.

Il est intéressant de remarquer que la notation des coefficients est ici spécifiée par les

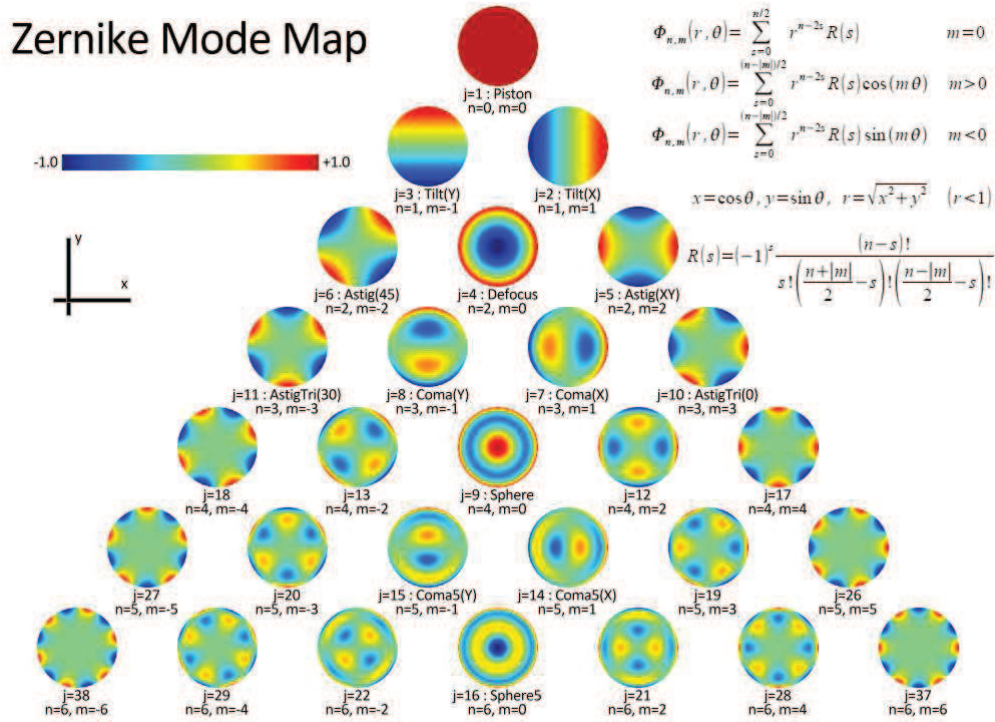


FIGURE 5.4 – Représentation des premiers ordres des polynômes de Zernike d'après le classement ANSI.

valeurs mathématiques n et m de la fonction les définissant. Cependant, dans beaucoup de cas les opticiens utilisent un ordre unique, appelé j , mais l'ordre j n'est pas un ordre universel pour les polynômes de Zernike. En effet, il existe plusieurs corrélations différentes entre les valeurs de n et m et la valeur j . Ces différents classements sont les suivants :

- ANSI pyramide (American National Standards Institute) : les ordres n et m sont considérés et classés avec m croissant puis n croissant. La valeur j , appelée mode s'obtient par le calcul : $j = \frac{n(n+2)+m}{2}$.
- Notation de Wyant : un ordre $n' = \frac{n+m}{2}$ est introduit. Les modes sont arrangés avec les valeurs de n' les plus faibles et les valeurs de m les plus grandes en premier. Les modes cosinusoidaux sont placés avant les ordres sinusoidaux.
- Notation de Noll : le facteur j est déterminé avec les valeurs de n les plus faibles en premier. Pour un même ordre n les valeurs de m nulles auront une valeur de j plus faible, puis les modes cosinusoidaux auront des valeurs paires et les modes sinusoidaux auront des valeurs impaires.

Dans le cadre de cette thèse, il a été décidé d'utiliser la nomenclature ANSI basée sur les valeurs des coefficients mathématiques de la définition de la fonction n et m .

La source étant définie sur le cercle unitaire (ρ, ϕ) , elle peut être décomposée en une

somme infinie de polynômes de Zernike, ces derniers étant orthogonaux et définis sur ce même disque unitaire. La source, notée src , peut donc s'écrire de la façon suivante :

$$src(\rho, \phi) = \sum_{n=0}^{n=+\infty} \sum_{m=-n}^{m=n} c_{n,m} Z_n^m(\rho, \phi) \quad (5.2)$$

avec n et m les valeurs de l'ordre du polynôme de Zernike, $Z_n^m(\rho, \phi)$ le polynôme d'ordre (n, m) .^I et $c_{n,m}$ le coefficient de la somme infinie pour l'ordre (n, m)

Afin de décomposer une source quelconque en une somme de polynômes, une régression linéaire a été réalisée en utilisant le logiciel Matlab. Cependant, il est impossible de réaliser cette régression sur une somme infinie de polynômes. Dans un premier temps l'étude de la décomposition pour un très grand nombre de polynômes a donc été menée. Les valeurs de n et de m varient ainsi de 0 jusqu'à la valeur fixée k telle que décrit dans l'équation 5.3.

$$src(\rho, \phi) = \sum_{n=0}^{n=k} \sum_{m=-n}^{m=n} c_{n,m} Z_n^m(\rho, \phi) \quad (5.3)$$

Il est possible de représenter cette décomposition afin de la rendre plus compréhensible, comme dans l'image 5.5.

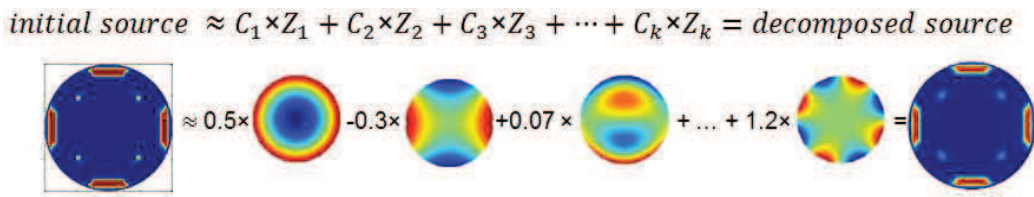


FIGURE 5.5 – Illustration visuelle de la décomposition en polynômes de Zernike. Les polynômes représentés ici ne sont pas les premiers ordres mais des ordres pris aléatoirement de façon à mieux illustrer cette décomposition (les premiers ordres sont graphiquement moins significatifs).

Plus l'ordre du polynôme est important, plus ce dernier a un coefficient associé faible lors de la décomposition d'une source. Il est ainsi possible de tronquer les plus grands ordres du polynôme décomposé, dans la mesure où leurs contributions pour le calcul de la différence entre deux sources sont faibles. Le graphique 5.6 représentant l'évolution des coefficients pour une source quelconque en fonction de la valeur de l'ordre j associé (en nomenclature ANSI) illustre la possibilité de cette réduction, les ordres élevés ayant des coefficients associés faibles.

I. L'ordre (n, m) représente l'ordre des polynômes de Zernike et varie de la façon suivante : $n + m$ pairs et $-n \leq m \leq n$. En faisant croître m puis n , des paires de valeurs représentant un ordre unique sont obtenues. Ces paires varient de la façon suivante : $(n, m) = (0, 0); (1, -1); (1, 1); (2, -2); (2, 0); (2, 2); (3, -3); (3, -1); (3, 1); (3, 3); (4, -4); (4, -2); (4, 0); (4, 2); (4, 4); (5, -5); (5, -3); (5, -1); (5, 1); (5, 3); (5, 5);$ etc... pour les 20 premières valeurs des polynômes.

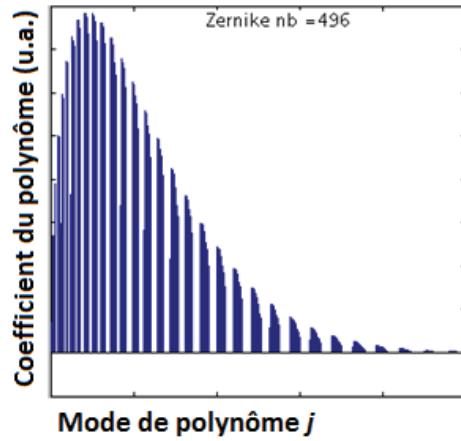


FIGURE 5.6 – Evolution des coefficients en fonction de j , pour les 496 premières valeurs de j . Plus l'ordre j est important plus le coefficient associé est faible. Leurs contributions à la décomposition de la source est minime. Il est donc possible de les tronquer.

La source une fois décomposée en polynômes est alors graphiquement très proche de la source initiale. Cependant, une fois encore la notion de graphiquement très proche n'est pas rigoureuse. Il sera donc nécessaire de chercher à savoir si cette différence est quantifiable. Pour ce faire la technique des ΔCD a été utilisée afin de mesurer l'impact sur les pv-band d'un changement entre la source initiale et la source décomposée. Pour différentes valeurs de k la source initiale d'une technologie quelconque a été remplacée par la source décomposée et l'impact de ce changement sur les pv-band mesurées. En traçant cet impact sur la fenêtre de procédé dans le graphique 5.7, il est à noter que pour cette étude la taille de la process window étudiée pour certains des motifs critiques et non la taille de pv-band a été étudiée.

Pour de faible valeur de k la source est très différente et l'impact sur la fenêtre de procédé trop important. A l'inverse, pour des valeurs de $k \geq 30$ la taille de la fenêtre de procédé est parfaitement acceptable puisque la variation de taille est de l'ordre de quelques pourcents.

En décomposant la source de la façon précédemment décrite, il a été possible de définir la source par une fonction mathématique inscrite dans l'espace vectoriel créé par les polynômes de Zernike, en partant d'une carte d'intensité.

En définissant cette source dans un espace vectoriel, il est donc possible d'étudier et de comparer deux sources, si celles-ci sont définies dans le même espace : elles sont décomposées pour la même valeur de k . Pour cela, la mesure de la distance Euclidienne est utilisée. La différence entre deux sources décomposées en polynômes de Zernike s'exprime :

$$diff = \sum_{n=0}^{n=k} \sum_{m=-n}^{m=n} (c_{1,n,m} - c_{2,n,m})^2 \quad (5.4)$$

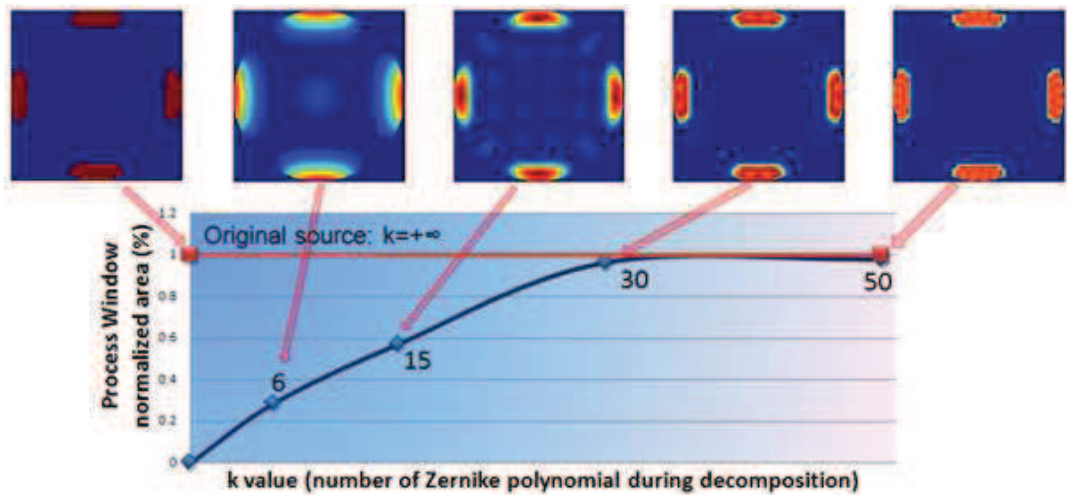


FIGURE 5.7 – Impact de l'utilisation d'une source décomposée à la place de la source initiale sur la fenêtre de procédé, en fonction de la valeur de k .

avec $diff$ la valeur de la différence entre les deux sources, $c_{1,n,m}$ la valeur du coefficient de la décomposition de la source 1 à l'ordre (n, m) et $c_{2,n,m}$ la valeur du coefficient de la décomposition de la source 2 à l'ordre (n, m) .

Cette décomposition permet alors de comparer deux sources, puisque moins la valeur de cette différence est importante, moins les deux sources sont différentes. L'illustration de la mesure de la différence entre plusieurs sources définies aléatoirement est représentée sur la figure 5.8.

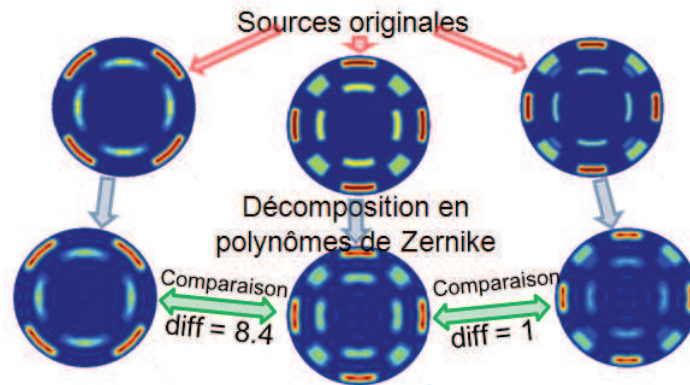


FIGURE 5.8 – Illustration de la mesure de la différence entre deux sources. Les valeurs sont des valeurs relatives et ne sont pas à comparer aux valeurs précédentes.

Cette décomposition ayant été réalisée à de très nombreuses reprises, dans le cadre

de cette thèse, un programme informatique a été développé pour faciliter cette mesure. L'image 5.9 représente une capture d'écran du logiciel associé.

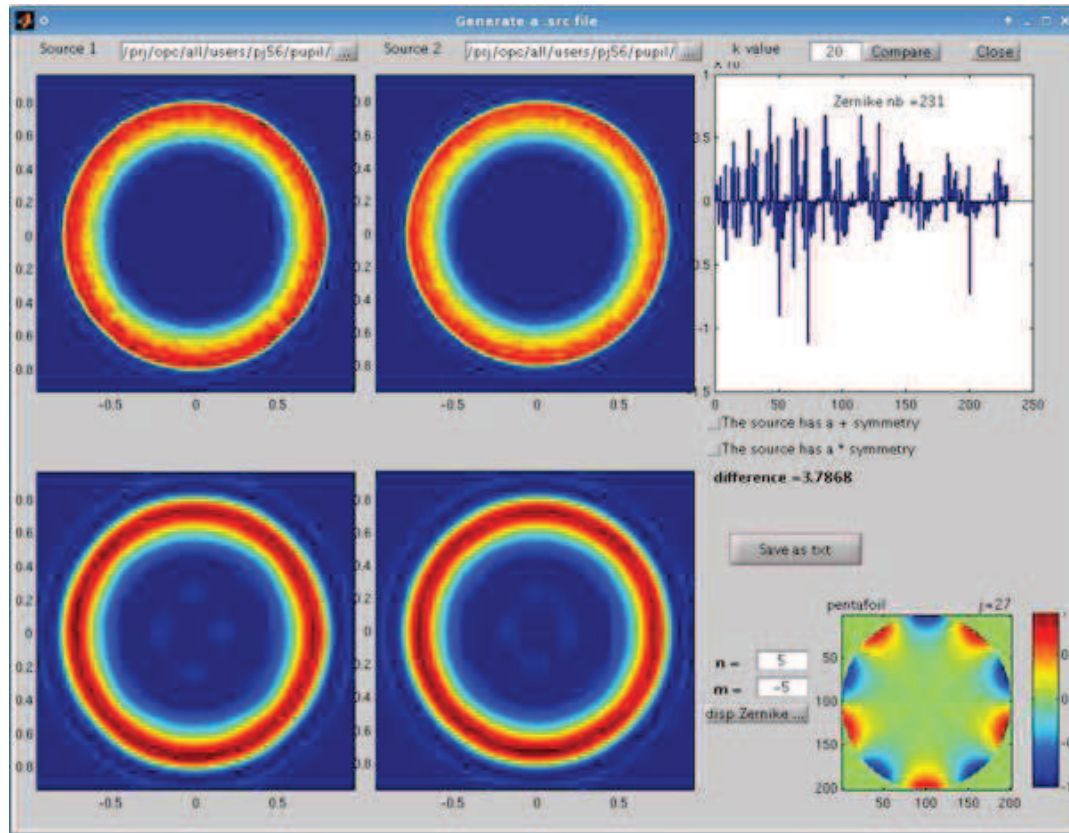


FIGURE 5.9 – Capture d'écran du logiciel de décomposition puis de comparaison des sources lumineuses utilisées en lithographie optique. Ce logiciel permet de mesurer la différence entre deux sources en utilisant la décomposition en polynômes de Zernike.

Afin de démontrer que la différence mesurée entre deux sources relativement proches a une signification pratique, les expériences décrites ci-après ont été réalisées. Le lien entre la différence et la variation de fenêtre de procédé pour un niveau de technologie donné a été analysé. En prenant une source définie pour une technologie spécifique et en mesurant la fenêtre de procédé sur différentes structures témoins sans variation d'OPC, puis en prenant d'autres sources plus ou moins différentes de la source initiale et en mesurant l'impact de l'utilisation de telles sources sur la fenêtre de procédé, le lien entre la différence de source et la variation de process window a été mesuré.

Pour ce faire, une source Cquad a été utilisée et la fenêtre de procédé mesurée sur un ensemble de structures. La source initiale a été légèrement modifiée afin de générer différentes sources. Les modifications opérées sont listées et expliquées ci-dessous :

- En modifiant les valeurs de σ du Cquad, des réductions et des augmentations de la taille de la source ont été appliquées. De telles modifications ont pour but d'illustrer un défaut potentiel du système de réduction optique.
- Des variations de l'angle d'ouverture des pôles du Cquad ont également été étudiées.
- Un bruit de fond plus ou moins important a été ajouté sur différentes sources pour en étudier l'impact. Ce type de bruit de fond pouvant par ailleurs être associé à un mauvais fonctionnement du scanner.
- En convoluant la source par une fonction gaussienne plus ou moins large, une dégradation du système optique de type "blur" a été simulée.

Chacune de ces modifications a été étudiée et donne des informations sur une possibilité de dysfonctionnement du scanner qui lui est associée. L'intérêt est ici de vérifier qu'il est possible de mesurer un dysfonctionnement matériel par simple mesure de la source.

Il est possible de constater sur le graphique 5.10 que l'impact d'une faible modification d'une source sur la fenêtre de procédé est effectivement relié à la mesure de la différence de la source par rapport à la source initiale.

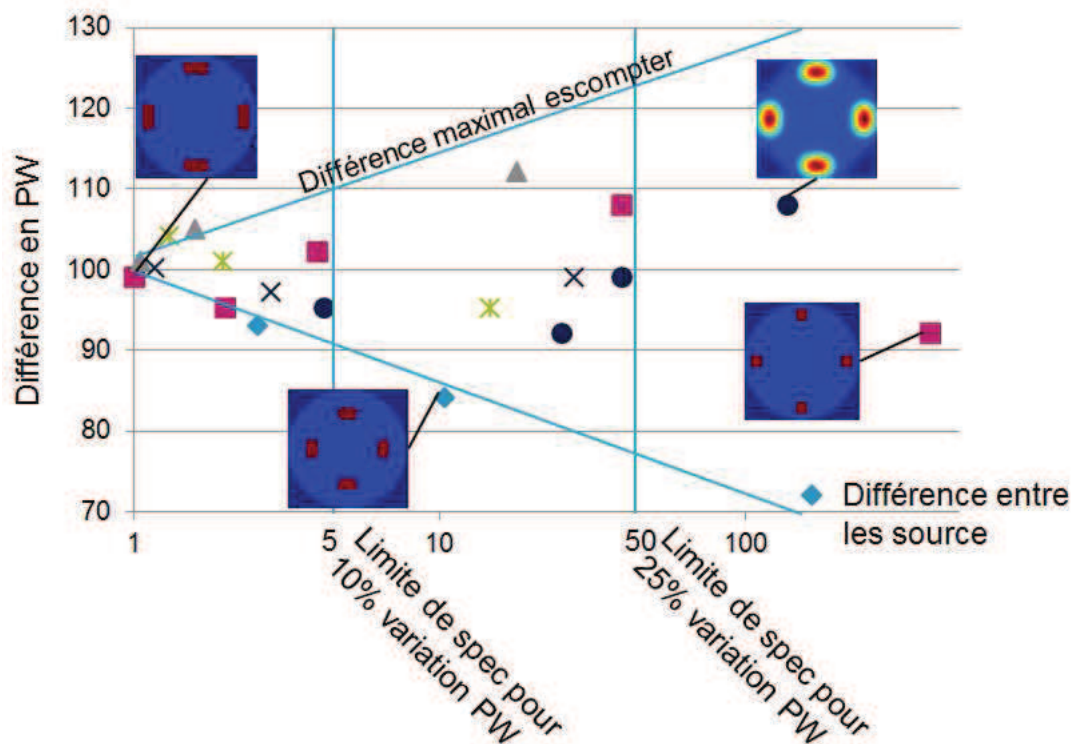


FIGURE 5.10 – Evolution de la fenêtre de procédé en fonction de la différence entre les sources mesurées par la méthode de décomposition en polynômes de Zernike pour des sources dégradées de façon artificielle.

L'intérêt de cette méthode est de démontrer que lorsque la source se dégrade, cela a un impact sur la fenêtre de procédé, et qu'il est possible de prédire cet impact en mesurant la différence de sources. La multiplication des simulations avec de nombreuses sources dégradées artificiellement a permis de montrer qu'effectivement ces deux phénomènes sont liés mais que l'impact de la différence des sources sur la qualité de la lithographie est difficilement prévisible. Il est cependant possible de définir des spécifications au-delà desquelles l'impact d'une variation de la source n'est plus négligeable.

Ainsi, lors de l'apparition d'un défaut sur la source suite à un problème scanner, il suffit de mesurer la source pour savoir quel impact maximum cette dernière peut avoir sur la qualité de la lithographie.

5.3 Impact de la source sur le modèle optique

Lors du procédé d'optimisation de la source, cette dernière varie plus ou moins. Il est en conséquence important de retranscrire cette variation sur le modèle utilisé.

Il ressort de la sous-section 1.4 traitant des modèles que ceux utilisés dans l'industrie sont décomposés en deux parties. La première partie est composée du modèle optique qui rend compte de l'ensemble du système optique, tandis que la seconde partie composée du modèle résine représente le comportement de la plaquette et de la résine.

La partie du modèle optique utilisée en général durant les simulations est un modèle de Kernel et contient des informations sur les différentes parties du système optique. Il prend donc directement en compte la modification de la source. Ainsi lors d'un changement de source due à une optimisation de cette dernière par la technique SMO, il est nécessaire de recalculer le modèle. L'image aérienne, résultat de ce calcul, sera approximée mais suffisante.

La partie résine du modèle quant à elle se base sur des mesures et permet de lier l'image aérienne de sortie du modèle optique aux résultats mesurés sur la plaquette. Dans le cadre de cette étude, un modèle à seuil variable de type VT5 a été utilisé. Il est à noter que si un tel modèle représente le comportement de la résine, il permet également de modéliser différents effets moindres, dont les aberrations du système optique, les effets de topologies du masque ainsi que les problèmes de ce dernier. En effet, les masques ne sont pas parfaits et sont sujets aux mêmes difficultés d'arrondissement des angles que pour les plaques de silicium imprimées. Le modèle résine facilite la modélisation de tout cela. La partie résine du masque est calibrée pour une certaine source optique donnée et dans le cas d'un changement de source aucun élément n'est modifié dans le modèle résine, contrairement au modèle optique. Il est toutefois impossible de savoir si une telle modification de la source impacte le modèle résine ou non.

Une étude a donc été réalisée pour étudier l'impact de ce changement de source sur la partie résine d'un modèle de type VT5.

5.3.1 Différence de résultats pour différentes sources

Une première expérience a été mise en œuvre pour étudier cet impact. Cela a consisté à étudier une plaque exposée avec une source S_2 et à comparer les résultats obtenus aux simulations effectuées avec un modèle résine calibré avec une source S_1 .

Pour réaliser cette expérience, une première plaquette a été exposée avec la source S_1 et mesurée. Ces mesures ont permis de calibrer un modèle résine lié à cette source. Les différences entre les résultats mesurés et les résultats simulés sont alors étudiées pour servir de référence de dispersion.

Une seconde plaque a ensuite été exposée avec la source S_2 et les mêmes structures mesurées. Dans le même temps, le modèle optique est mis à jour avec la nouvelle source, mais le modèle résine est gardé intact. Des simulations sont alors réalisées

pour les différents points mesurés, et les résultats comparés. Les différences entre les simulations et les mesures donnent une nouvelle dispersion.

Si le simple changement de source dans le modèle optique permet de prédire avec exactitude les résultats plaquettes, alors les deux dispersions doivent être similaires, et ce quelle que soit la source S_2 utilisée. Dans ce cas, cela implique que le modèle résine ne soit pas dépendant de la source optique et qu'il ne soit de ce fait pas nécessaire de le recalibrer lors du changement de source. Le principe de cette méthode est représenté sur le graphique 5.11.

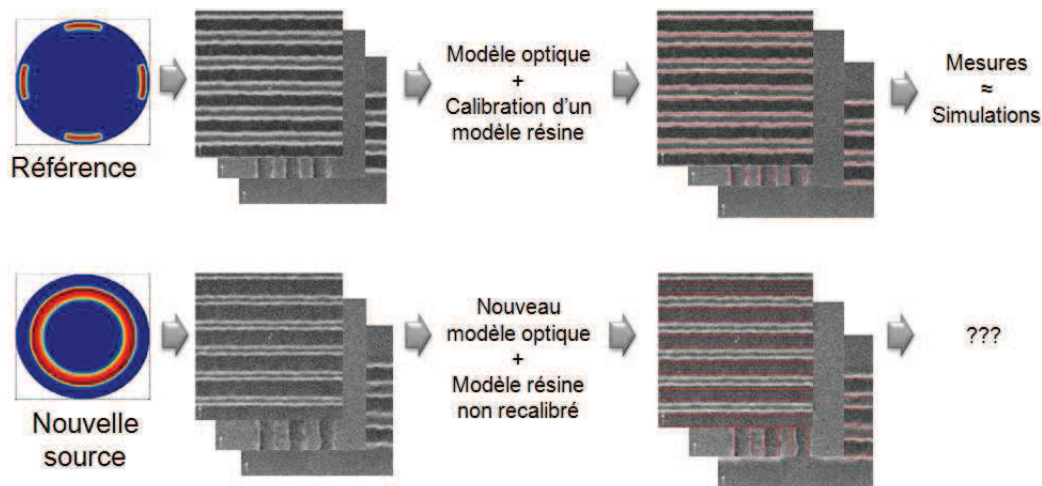


FIGURE 5.11 – Illustration de la méthode de vérification de la stabilité du modèle résine lors du changement de source. Avec la source Cquad, des structures sont exposées et mesurées afin de calibrer un modèle résine. La source annulaire sert quant à elle uniquement à exposer les mêmes structures, ainsi qu'à modifier le modèle optique. Le modèle résine n'est pas recalibré. Des différences peuvent donc apparaître entre les simulations et les mesures. Ce sont ces différences que la méthode cherche à quantifier.

En pratique, une plaque d'un niveau technologique C020 a été exposée et mesurée. Un modèle de type VT5 a ensuite été calibré à partir de ces mesures, avec une exactitude telle que l'écart entre les mesures et les simulations soit faible. Cet écart, appelé dispersion, est représenté en bleu sur les graphiques 5.12 et 5.13 pour un ensemble réduit de structures témoins à une et à deux dimensions.

Une seconde plaque a ensuite été exposée avec une source très proche du Cquad initial. Cette dernière, représentée sur la figure 5.12 donne pour ces mêmes structures des différences similaires à celles induites par la source Cquad.

Une troisième plaque a également été exposée avec une source annulaire complètement différente de la source Cquad. Cette source annulaire est représentée sur la figure 5.13 et induit des différences entre les résultats mesurés et les résultats simulés.

Il est à noter que ces différences sont bien plus importantes que celles induites par la source Cquad.

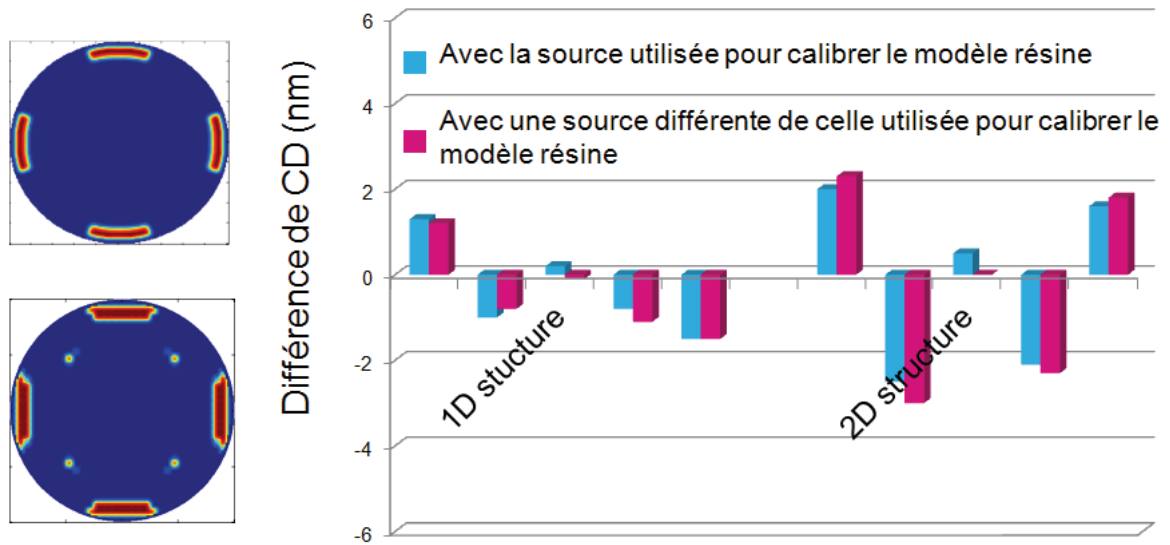


FIGURE 5.12 – Différence de CD entre les résultats simulés et mesurés pour les deux sources. Cette différence est sensiblement la même pour les deux sources. Le modèle résine possède une divergence de 3nm pour les deux sources pour les structures 1D et de 5nm pour les structures 2D.

Il devient alors évident que le modèle résine doit tenir compte de ce changement de source lorsque, comme dans le second cas, la variation de celle-ci est grande. Cependant, cette notion de différence de source n'étant pas triviale, il est impératif d'utiliser une métrique permettant de mesurer cet écart.

Afin de quantifier cette notion de différence de source, il est possible d'utiliser la technique de décomposition en polynômes de Zernike. Cette technique décrite dans la section 5.2.2 permet en effet de représenter la distance entre deux sources comme une distance euclidienne.

5.3.2 Lien entre la différence des sources et la divergence du modèle

Pour finir, de nouvelles plaques ont été exposées et les sources utilisées comparées à la source de référence, à l'aide de la méthode de décomposition en polynômes de Zernike. Chacune de ces plaques a ensuite été mesurée pour obtenir la divergence du modèle par rapport aux mesures. En mettant en relation cette divergence du modèle et la différence de la source, il a été possible de tracer les graphiques 5.14 et 5.15. Sur ces graphiques, le constat peut être fait que cette divergence semble proportionnelle à la différence de source.

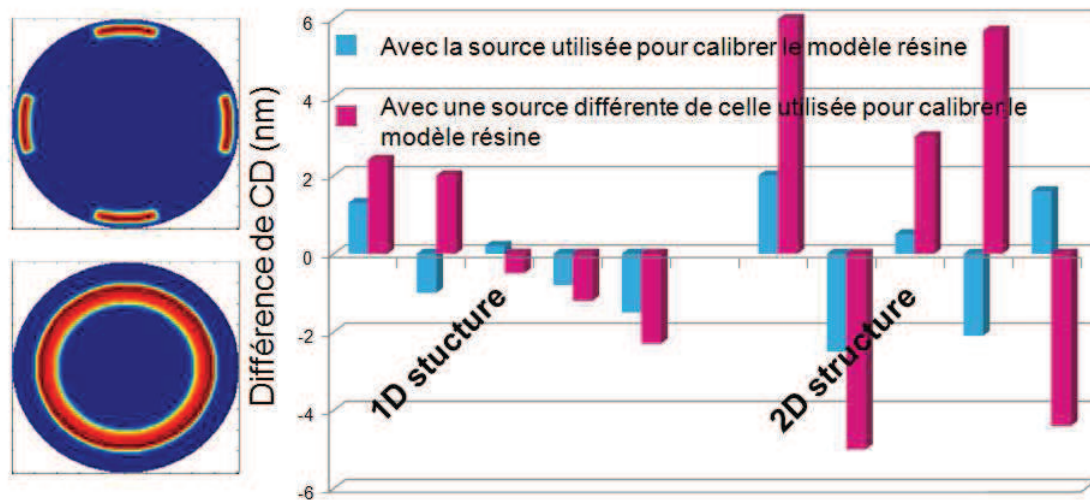


FIGURE 5.13 – Différence de CD entre les résultats simulés et mesurés pour les deux sources Cquad et Annulaire. Cette différence change en fonction de la source et devient très élevée dans le cas de la source annulaire. Les résultats ne sont donc plus assez prédictibles par le modèle résine. La divergence est ici de 12nm pour les structures 2D et de 7nm pour les structures 1D.

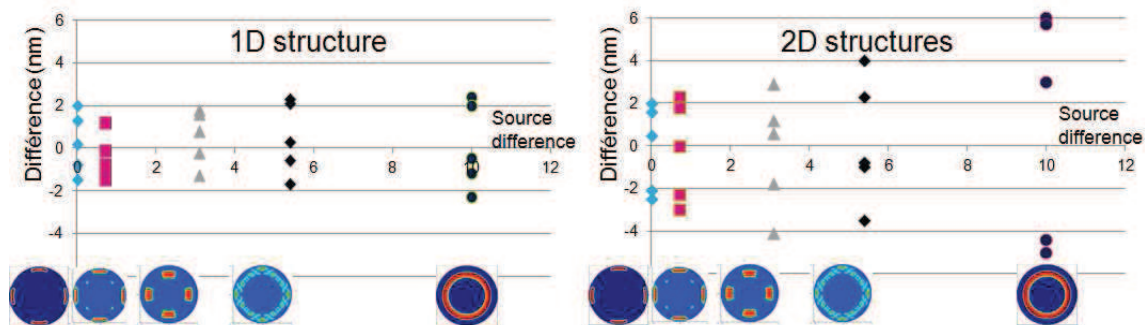


FIGURE 5.14 – Il est possible de relier l'échelle de différence de CD, appelée divergence à la différence entre la source utilisée pour calibrer le modèle résine et la source utilisée lors de l'exposition.

Un tel résultat met en avant le fait que lors du changement de la source par un procédé d'optimisation de celle-ci, il est important de recalibrer la partie résine du modèle lorsque la source finale est trop différente de la source avec laquelle le modèle a été calibré initialement. Cette différence peut-être calculée, comme indiquée précédemment, grâce à la méthode de décomposition en polynômes de Zernike. Il en découle, dans un premier temps, que lors de la qualification d'une nouvelle

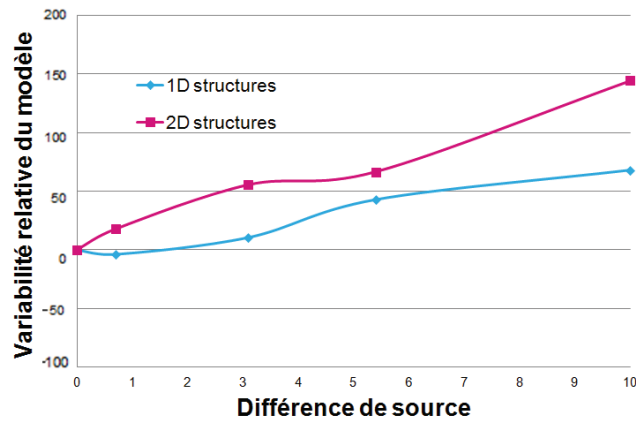


FIGURE 5.15 – Ainsi, la modification d’une source optique va augmenter la divergence de façon proportionnelle à sa différence par rapport à la source du modèle résine, et ce de façon quasi indépendante pour les motifs 1D et 2D.

source optimisée, seuls les résultats de l’image aérienne doivent être pris en compte pour s’affranchir de la divergence du modèle résine. Dans un second temps, il devient intéressant dans certains cas, toujours lors de l’optimisation de la source, de limiter celle-ci afin d’en obtenir une proche de la source initiale, dans le but de s’affranchir de la contrainte de recalibrage d’un modèle résine.

5.4 Application de l'étude des variations de la source

En pratique, ces méthodes de mesure de la différence sur la source induite par le scanner ont pu être appliquées à plusieurs reprises. En effet, dans le courant de cette thèse, un des appareils de fabrication des micros composants, le scanner d'exposition, a présenté un défaut suite à une erreur de manipulation. La source du scanner laissait alors apparaître certains pixels allumés en permanence, tel qu'illustré sur le graphique 5.16. L'impact d'un tel défaut du scanner pour différentes technologies demandait à être étudié.

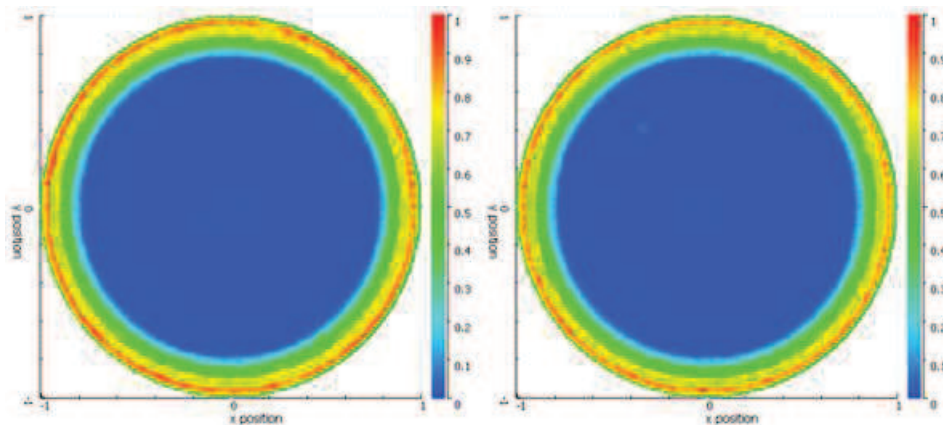


FIGURE 5.16 – Sources mesurées sur le scanner avant (à gauche) et après (à droite) l'apparition du défaut sur ce dernier.

Dans un premier temps, une étude s'appuyant sur la décomposition en polynômes de Zernike a pu être mise en place rapidement. Cette technique étant très rapide, il est possible d'obtenir à l'aide de cette dernière des informations sur l'importance de cette différence en quelques minutes. Les résultats obtenus ainsi étant largement au-dessus des spécifications fixées dans le cadre de cette thèse et rendant compte d'une variation standard au sein du scanner, le problème a dû être étudié plus avant.

Une seconde étude basée sur des simulations a donc été réalisée. En se basant sur un modèle optique calculé avec la source initiale (qui est différente de la source théorique, cf. partie 5.1), il est possible d'obtenir les tailles de CD et de pv-band attendues pour certaines structures tests sélectionnées. En remplaçant ensuite la source du modèle optique par la source présentant le défaut, et à l'aide de nouvelles simulations, les nouvelles valeurs de CD et de pv-band peuvent être calculées.

La différence sur le scanner peut alors être reliée aux différences de tailles de CD et de pv-band. Dans le cas étudié ici, la différence la plus grande est de l'ordre de $0.5nm$ pour les structures à une dimension et de près de $2nm$ pour les structures en deux dimensions. Ces différences étant au-dessus des spécifications fixées pour un usage standard du scanner, l'étude va dans le sens des résultats par comparaison via les polynômes de Zernike.

Finalement des mesures effectuées à l'aide d'un microscope électronique à balayage ont permis de corroborer les études réalisées par simulations en termes de variation de CD. En effet, les mêmes divergences de CD ont pu être observées sur les structures regardées. Le problème ayant ainsi été qualifié et quantifié, une opération de maintenance a pu être demandée sur le scanner afin de résoudre le problème.

Si les mesures SEM ont une portée très largement supérieure aux simulations et à la comparaison par polynômes de Zernike, elles sont longues et chères à réaliser. Il est donc impossible d'effectuer ce genre de mesure régulièrement en vue de vérifier le bon fonctionnement du scanner et les étapes précédentes sont donc nécessaires. Celles-ci permettent d'avoir une vision générale de l'état du scanner et permettent à l'aide de spécifications établies en partenariat avec le fabricant du scanner de contrôler son évolution dans le temps.

Ces simulations ont permis en effet de contrôler le comportement du scanner lors du déplacement des micros miroirs. Afin de mettre en évidence la capacité de ce dernier à revenir à une source demandée, l'expérience suivante a été réalisée, en prenant de façon arbitraire une source freeform et différentes structures à une et deux dimensions et en utilisant la méthode de variation du CD. La source souhaitée a été réalisée à l'aide du module Flexray et mesurée avec un outil interne au scanner permettant de mesurer la forme de la source. Une ou plusieurs autres sources sont ensuite générées dans l'optique de faire bouger les micros miroirs. Puis, la source initiale est de nouveau générée et mesurée. La précision des miroirs est alors mise en avant, puisque la source doit avoir exactement la même forme que la source initiale et ne doit donc pas impacter la taille d'un CD simulé.

La source a été mesurée 40 fois de suite avec, entre chaque mesure, la formation aléatoire d'autres sources. Les 40 sources ainsi mesurées ont engendré la création de 40 modèles optiques différents. Ces modèles ont alors permis de simuler les variations de CD sur différentes structures 1D et 2D et les résultats obtenus sont affichés sur le graphique 5.17.

Il est possible de remarquer la grande reproductibilité de la source puisque la variation de CD induite par le déplacement et le remplacement des micros miroirs est parfaitement à l'intérieur des limites spécifiées.

La technique de décomposition et comparaison des sources basée sur les polynômes de Zernike a également été utilisée afin de vérifier l'état du scanner à travers le temps. En effet, simplement en mesurant la source de façon régulière et en la comparant à la source de référence, il est aisé de voir apparaître les problèmes. Par exemple, sur le graphique 5.18, le problème apparu sur le scanner est très facilement identifiable. Il est également notable qu'il a été rapidement traité et qu'aucun autre défaut n'est apparu par la suite.

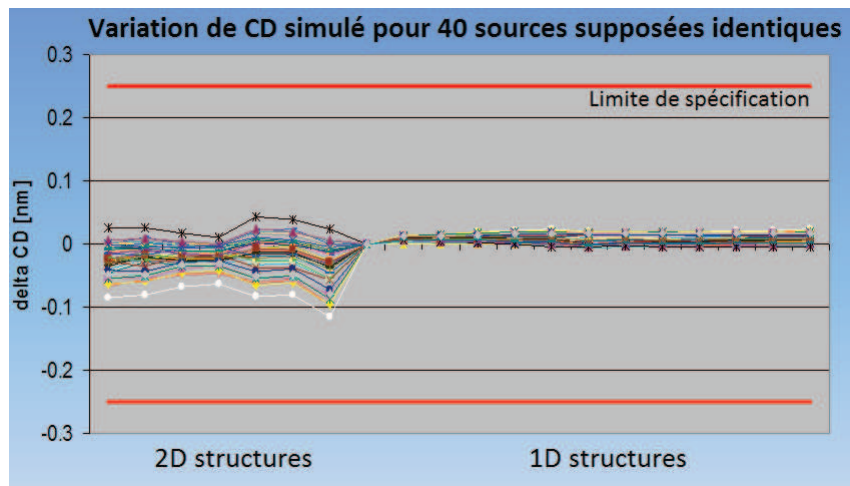


FIGURE 5.17 – Variation des dimensions critiques 1D et 2D lors de la génération de la source. La source est générée 40 fois et mesurée afin d’obtenir un modèle optique. Les dimensions critiques sont alors simulées et comparées aux variations maximales attendues. Chaque ligne représente ici les valeurs obtenues avec une source différente. Il est alors possible de dire que le scanner Flexray possède une grande reproductibilité. SIMULÉE

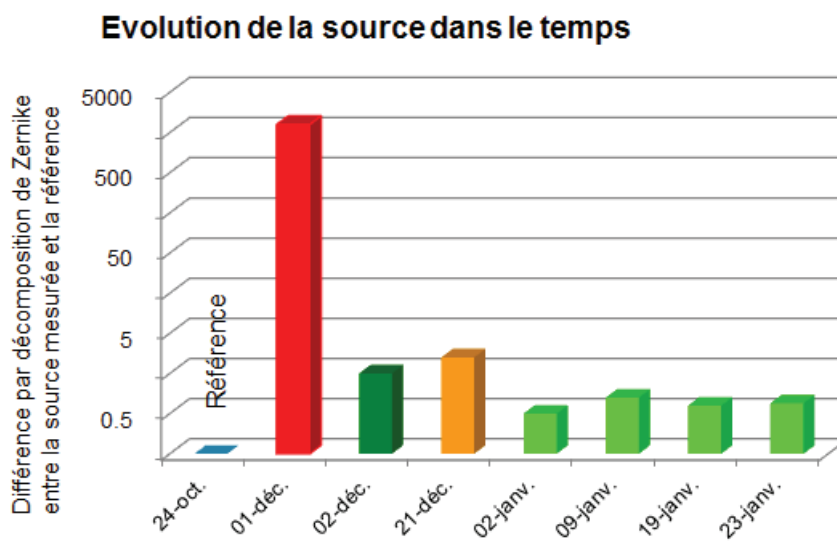


FIGURE 5.18 – Evolution de la source en fonction du temps. La décomposition en polynômes de Zernike est utilisée ici afin de surveiller l’apparition d’un défaut sur le scanner, tel qu’apparu au 1er décembre (abscisses).

Chapitre 6

La cooptimisation

6.1 SMO et la lithographie inverse

Lors de la mise en œuvre de la technique d'optimisation des sources, plusieurs phénomènes apparaissent. Dans un premier temps, il est intéressant de se pencher sur le processus de l'optimisation de la source en corrélation avec les autres éléments avec lesquels la source interagit. Ce chapitre va décrire ce processus et proposer des solutions innovantes aux difficultés rencontrées.

La forme des motifs présents sur le masque peut ainsi être étudiée. En effet, ce manuscrit s'est jusqu'à présent uniquement attardé sur la présentation de la question de la source optique : sa forme, sa méthode d'obtention, l'appareillage permettant sa génération ou bien sa stabilité. Mais durant l'étape d'obtention de la forme de la source, il est également important de se pencher sur sa relation avec le masque.

Une première étude peut être menée concernant l'OPC lié à la source. En effet, il apparaît évident que l'utilisation d'une source hors-axe n'est pas suffisante afin de résoudre certains motifs critiques et que l'utilisation d'un OPC est nécessaire. Cet OPC va permettre de corriger les effets de proximité et ainsi permettre une bonne formation sur le wafer des motifs souhaités.

Cependant, en pratique, les logiciels industriels ne se basent pas sur un OPC standard tel que décrit dans la section 1.5. Afin de calculer la forme de la source de façon plus rapide, ces derniers utilisent à la place la méthode de lithographie inverse. Ce mode opératoire permet d'obtenir une image du masque différente de celle obtenue à l'aide d'un OPC classique, et est appelé technique d'optimisation du masque ou MO de l'anglais "Mask Optimization". L'avantage de cette méthode est de permettre un calcul de la forme du masque et de la forme de la source simultanément. Combinée ainsi à la technique d'optimisation de la source, appelée parfois SO pour l'anglais "Source Optimization", cela donne la technique SMO, "Source Mask Optimization", sujet principal du travail réalisé dans le courant de cette thèse.

La technique de lithographie inversée, si elle présente l'avantage de donner une source bien plus exacte qu'avec un procédé itératif sur le masque et sur la source en même temps, est une technique très jeune. De nombreux problèmes de maturité sont donc

apparus au début de la mise en œuvre. Ainsi, les rendus sur le masque pouvaient poser problèmes en plusieurs points, dont trois seront étudiés ici.

Dans un premier temps un problème venant du modèle résine calibré à l'aide d'un OPC standard a été identifié. En effet, lors de la calibration d'un modèle résine, les structures étudiées pour calibrer le modèle sont des structures test qui se retrouvent dans l'OPC final. Or le rendu de la lithographie inverse peut être complètement différent du design initial et de ce fait complètement différent des OPC standards. Pour ce cas de figure le modèle n'est pas calibré et des divergences peuvent apparaître. Ce fut par exemple le cas sur certains tests réalisés très tôt dans le courant de cette thèse, avec notamment des barres d'assistance à l'impression ("scattering bar", abordées lors de l'introduction à l'OPC, partie 1.5) trop imposantes. Le modèle ne prévoyant pas leur impression, le logiciel avait alors créé des barres trop grosses qui génèrent des impressions de motifs, tels que représentés sur la figure 6.1. Ce problème contourné depuis, illustre parfaitement l'impact des divergences entre les OPC standards et l'optimisation de masque.



FIGURE 6.1 – Illustration du problème de la printabilité des barres d'assistance à l'impression suite à une optimisation du masque du processus SMO mal calibré.

Un second problème est apparu lors de la vérification des MRC (cf. 1.5.1). En effet, la lithographie inverse donne des résultats souvent très agressifs en termes de formes de motifs sur le masque. Ces formes agressives permettent de mieux résoudre les motifs critiques, mais ne sont pas nécessaires pour la résolution de motifs simples. La technique SMO ne fait cependant pas la distinction entre les endroits où une telle agressivité de motif est nécessaire et les endroits où ce n'est pas le cas. Il en résulte des masques difficiles à imprimer voir qui violent certaines règles MRC donc qui coûtent chers. De plus, de tels motifs sont en général plus sujets au MEEF que des structures simples. Un meilleur contrôle du masque est alors demandé pour des endroits où cela n'est pas nécessaire. La figure 6.2 illustre l'agressivité des motifs présents sur le masque et ce quelle que soit la forme des motifs à réaliser.

Enfin, un des gros inconvénients de la lithographie inversée réside dans la difficulté à modifier certains réglages en fonction des endroits étudiés. En OPC standard il est possible de spécifier que lorsque le logiciel tente de résoudre certains types de motifs critiques, certaines règles supplémentaires doivent être appliquées. La complexité de ces motifs peut parfois être très importante et cela permet de mieux résoudre les



FIGURE 6.2 – Lors d'un OPC inverse, afin de reproduire les motifs (en rayés bleus), un masque (en noir) complètement décorrélié du motif est généré par le calcul. Ces motifs complexes sont parfois difficiles à créer sur le masque et ne sont pas toujours nécessaires. Ils augmentent alors la complexité, donc le prix du masque pour un gain parfois inutile.

endroits critiques sans devenir trop exigeant sur les motifs simples. Cependant en lithographie inverse de tels motifs ne peuvent pas être définis avec un aussi grand contrôle. Cet outil présente ainsi un réel manquement pour les experts industriels.

6.2 Le problème du temps de calcul

En plus des difficultés amenées par l'utilisation de la lithographie inverse, cette technique est lente. En contre-partie, le fait qu'elle ne soit pas itérative permet d'obtenir la forme de la source optique avec une plus grande précision. Dans les processus actuels, cependant, les résultats n'étant pas toujours acceptable après une première lithographie inverse, un procédé itératif est alors mis en place et les images du masque et de la source par lithographie inverse sont recalculées plusieurs fois, afin d'améliorer les résultats.

Il en résulte un temps de simulation très long, beaucoup plus long que pour un OPC standard. Cette différence peut atteindre un facteur 100 pour des motifs complexes. Ce temps de simulation élevé pose problème lors de l'utilisation de la technique sur un trop grand nombre de motifs ou sur une surface trop importante. De plus, puisqu'il se base sur la physique de Fourier, une répartition périodique des structures est nécessaire afin de réaliser le calcul.

La limitation qui en découle est la suivante : il est impossible de réaliser une optimisation de type SMO sur l'ensemble des motifs présents sur le masque. La technique SMO nécessite des motifs de petites tailles. De plus, les calculs étant simplifiés pour les motifs périodiques, ces derniers seront privilégiés lors de l'optimisation SMO. Les motifs non périodiques sont cependant parfaitement gérés mais ralentissent grandement le temps de calcul. Afin de palier ce problème, la solution la plus simple souvent apportée est de forcer la périodicité des motifs. Ainsi, même si ces derniers ne sont pas périodiques, pour les besoins de calcul, ils peuvent être répétés artificiellement. Il en découle alors une limitation du fait de ces différences entre les motifs sur lesquels sont réalisés l'optimisation et les motifs réels placés sur le masque. Dans certains cas, cette différence est bénigne et l'utilisateur peut choisir de forcer ainsi la répétition des motifs.

Un des plus grands défis de la technique SMO réside donc dans le choix de ces motifs. En effet, puisqu'il n'est pas possible de réaliser une SMO sur l'ensemble des motifs souhaités, il faut la réaliser sur un sous-ensemble de ces motifs. Le choix de ce sous-ensemble est encore aujourd'hui difficile à effectuer et plusieurs options sont proposées par les différents fournisseurs. Ces options permettent à l'utilisateur de choisir pour lui quels motifs doivent nécessairement faire partie du sous-ensemble permettant l'optimisation, et peuvent être basées sur différentes techniques physiques ou empiriques.

Ces techniques sont des solutions payantes et pour l'instant imparfaites, puisqu'elles se contentent de supprimer d'une bibliothèque les candidats, en double, n'apportant pas d'information lors de la formation de la source, ou n'étant pas limitant en terme de qualité de la lithographie. Cette bibliothèque représente l'ensemble des candidats potentiels pour l'utilisation de la technique SMO. Elle est à définir par l'utilisateur.

Ces candidats ainsi que leur sélection posent justement de nombreux problèmes. En effet, ces candidats sont des extraits du masque et sont censés représenter l'ensemble de ce dernier. Ces extraits sont constitués de morceaux choisis et découpés sur le

masque. La découpe de ces extraits est justement un processus parfois complexe, puisqu'il peut s'avérer difficile de bien situer les endroits de découpe pour certains motifs à plusieurs dimensions non périodiques.

L'expérience du lithographe joue alors un rôle primordial et c'est à lui qu'incombe d'effectuer ces découpages, qu'ils soient utilisés directement par la technique SMO ou retriés par les outils des fournisseurs avant d'être utilisés avec SMO. Pour l'instant aucune solution standard n'a pu être trouvée. Cependant quelques grandes lignes directrices ont pu être définies lors du choix des candidats. Ces lignes directrices sont listées ci-dessous :

- Certains motifs peuvent être utilisés car ils sont présents un grand nombre de fois dans le motif. C'est par exemple le cas des motifs de SRAM, de matrices de contacts ou de réseaux de lignes pour les technologies "lines/cut". Il est alors important de les résoudre avec la plus grande précision, et une source optimisée en utilisant ces motifs peut faciliter cette résolution.
- Certains motifs test peuvent représenter les motifs critiques présents sur le masque sans pour autant en être eux mêmes. Par exemple, une répétition de bouts de lignes créés artificiellement pour optimiser la source peut être utilisée afin de représenter les difficultés latentes à ce problème spécifique. De nombreuses autres forment peuvent être utilisées telles des formes de U, des formes de T, etc...
- Les parties les plus critiques peuvent également être utilisées lors de l'optimisation de la source. L'idée n'est pas ici d'obtenir une source qui améliore le rendu global mais d'avoir une source permettant de résoudre ces motifs critiques particuliers. Si en effet un motif est seul limitant pour une condition de la fenêtre de procédé, il sera possible d'agrandir la fenêtre globale en amenant ce motif à se résoudre.

Une fois les motifs sélectionnés, la source est optimisée sur ces derniers au cours d'un processus SMO.

6.3 Source Optimisation et OPC

L'une des solutions proposées afin de palier les problèmes liés à l'utilisation de la lithographie inverse est l'utilisation d'un OPC classique à la place de la partie d'optimisation du masque. En effet, cette utilisation présenterait de nombreux avantages et résoudrait beaucoup des difficultés énoncées ci-dessus. Dans un premier temps le contrôle du résultat sur le masque permettrait de contourner les problèmes de sélection des motifs critiques, des MRC et des designs agressifs, ou les soucis de modèle. De plus les scripts d'OPC étant étudiés depuis plus longtemps ils sont bien mieux maîtrisés par les industriels et sont plus matures. D'évidence, une telle solution présenterait de nombreux avantages.

Cependant, dans la pratique un tel changement n'est pas simple à réaliser. En effet, lors du calcul de la source, la lithographie inverse ne peut pas intégrer un procédé itératif dans le calcul du masque. Le masque est donc soit figé, soit complètement libre comme c'est le cas dans les scripts MO. Il en résulte une image du masque en intensité pas nécessairement liée à la forme des motifs. Il est donc impossible de faire bouger des bords de motifs du masque (appelés "edge") afin d'améliorer la qualité de la lithographie comme avec un OPC classique, ces bords n'étant pas définis lors du calcul. Comme cette étape est nécessaire à l'obtention de la source, elle ne peut être évitée.

Il apparait alors que si le masque, donc l'OPC, est fixé, il n'est pas nécessairement adapté à la source optimisée calculée.

En effet, la source étant utilisée lors de la simulation de l'OPC, elle va influencer sur les résultats de l'image aérienne, donc sur le déplacement des bords en OPC, et donc sur la forme de l'OPC final. Un exemple est représenté sur l'image 6.3, où, pour résoudre un même motif avec deux sources différentes, deux OPC différents sont trouvés.

Lors de l'optimisation de la source en fixant le masque donc l'OPC, une nouvelle source va être créée. Il devient alors nécessaire de recalculer l'OPC et de le modifier. Le problème se pose alors dans l'autre sens, puisque lors du procédé d'optimisation de la source avec un OPC fixé les données du calcul de lithographie inverse permettant de calculer la source vont être modifiées par le nouveau masque. Il en découle que la source n'est alors plus nécessairement la meilleure source possible. Il devient nécessaire de la recalculer.

Ceci peut s'expliquer également en imaginant les figures de diffraction de l'ensemble des motifs présents sur le masque. Lorsque l'OPC change, certains motifs voient leurs tailles critiques se modifier. Cela peut être en termes de largeur d'une ligne, en termes de distance entre une fin de ligne et les motifs les plus proches dans son prolongement, concernant des valeurs de pas pour un couple de lignes si les bords extérieurs sont éloignés etc.... Or si la taille des motifs change, alors l'image de diffraction va changer. L'image de la source diffractée dans le plan de la pupille ne sera plus la même, et rien ne garantit alors que les surfaces de recouvrement des images diffractées soient identiques aux surfaces de recouvrement précédentes. La qualité de la lithographie peut s'en retrouver impactée et la solution ne peut alors plus être



FIGURE 6.3 – Lors du calcul de l'OPC pour un même ensemble de structure en utilisant deux sources différentes, deux OPC différents sont obtenus. Les zones bleues correspondent aux endroits où les deux OPC sont retrouvés, tandis que les zones blanches et rouges représentent les endroits où seul l'un ou l'autre des OPC est retrouvé. Ceci illustre les différences induites sur l'OPC par le changement de la source dans le modèle optique.

qualifiée d'optimale. Il devient nécessaire de recalculer soit la source soit l'OPC. Il découle de ceci une solution itérative qui optimise ainsi, le masque par un OPC standard, puis la source par un procédé SO utilisant la lithographie inversée. Le processus est reproduit jusqu'à obtenir un résultat acceptable.

En pratique, nous avons pu vérifier que dès la seconde itération la variation sur la source ainsi que sur la fenêtre de procédé est négligeable. La figure 6.4 illustre les sources après la première et la seconde optimisation, ainsi que les fenêtres de procédé associées. Il apparaît que la différence en termes de résultats est trop faible et ne justifie pas une telle augmentation en termes de temps de simulation.

Le processus peut alors être retranscrit comme suit :

- pour un design donné et une source arbitraire, un premier processus d'OPC est lancé,
- avec cet OPC lié au design, il est possible d'obtenir la source optimale à l'aide d'un script de type Source Optimization SO,
- une fois la nouvelle source définie, le modèle optique est mis à jour,
- ce modèle est ensuite utilisé avec le même script d'OPC afin d'obtenir le masque optimal associé à la source,
- ce couple Source OPC est jugé comme suffisant et qualifié à l'aide de logiciels spécifiques d'ORC (cd. section 1.3.7).

Ce procédé appliqué dans la section 4.3 a été utilisé tout au long de la thèse.

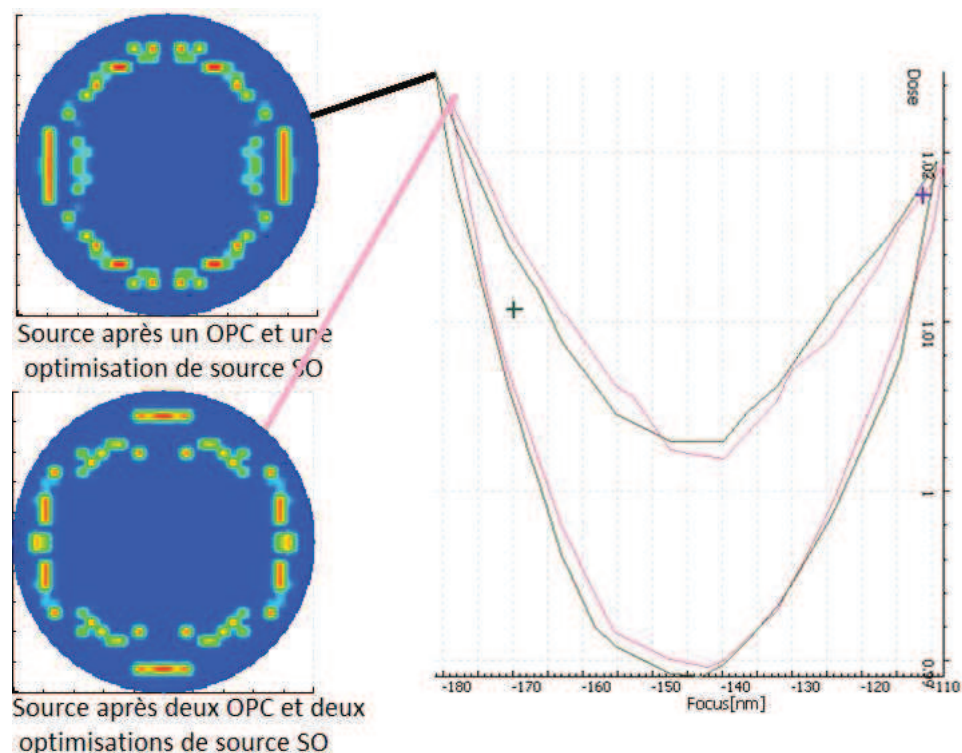


FIGURE 6.4 – Lors du processus itératif de l’optimisation de la source, il est possible de constater que pour deux itérations consécutives, deux OPC différents sont obtenues et deux sources différentes en découlent. Cependant, les différences entre ces deux sources, ainsi que les résultats de lithographie obtenue pour ces deux sources ne sont pas suffisamment importants pour justifier l’augmentation de temps de calcul induite par une seconde itération.

6.4 L'impact de la forme du motif cible et SMT0

6.4.1 Impact de la modification des motifs souhaités en SMO

Toujours dans le but d'augmenter la résistance de la lithographie face au procédé, différents aspect de la cooptimisation ont été étudiés. En effet, si la forme de la source est dépendante de la forme des motifs sur le masque de par la présence de l'OPC, elle est donc également dépendante de la forme des motifs finaux sur laquelle est basée l'OPC.

En effet, lors de la modification de la forme finale des motifs souhaités, comme dans le cas d'un retargeting (cf. partie 1.3.1), les dimensions critiques caractérisant les motifs peuvent être changées. Il en découle une figure de diffraction différente et un OPC différent. Ainsi, de même que dans la section précédente, cette modification aura un impact sur la forme de la source optique.

La principale motivation d'une modification de target reste le gain en taille de fenêtre de procédé. En effet, l'étape de retargeting a pour but de faciliter la résolution des motifs critiques, en les rendant artificiellement plus larges, plus distants des autres motifs, etc... Il découle donc de ce procédé un gain en process window généralement important.

Il est possible de constater sur le graphique 6.5 l'impact du retargeting (en bleu) sur la source comme sur la fenêtre de procédé. Il apparait à la vue de ces éléments que la forme de la source est fortement liée à la forme de la target.

6.4.2 Retargeting basé sur le modèle optique

Différentes targets vont donner différents résultats et ainsi différentes fenêtres de procédé. En effet, si le fait de modifier la target modifie la process window, cela implique qu'il existe une target optimale qui permet d'obtenir la fenêtre de procédé la plus importante. Il en découle donc une potentielle optimisation de la target afin d'obtenir la plus grande fenêtre de procédé.

Toutefois, les techniques de modification de la forme des motifs souhaités sont aujourd'hui principalement basées sur des règles géométriques et appelées "rule based retargeting". Ces règles simples permettent ainsi de modifier les motifs au regard de leurs proches voisins géométriques. Aucune vérification, visant à confirmer qu'un tel déplacement du bord définissant le motif apporte un réel gain n'est effectuée. Seule l'expérience de l'utilisateur qui a présupposé du déplacement fera foi. L'ensemble du motif redessiné est bien testé, mais il est alors difficile de voir quels motifs ont été redessinés correctement.

Afin de s'affranchir d'un tel problème, une solution innovante a été proposée et une demande de dépôt de brevet est actuellement en cours. Cette solution propose un retargeting basé sur le modèle optique appelé "model based retargeting". Elle est basée sur plusieurs propositions simples listées ci-après, et permet de répondre aux exigences fixées en termes de rapidité et de résultats.

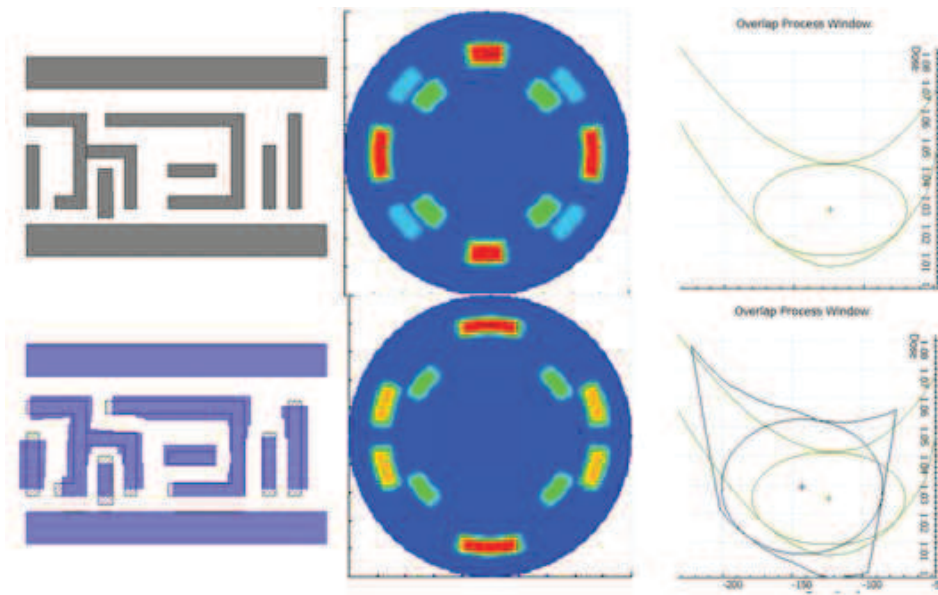


FIGURE 6.5 – Illustration de l’impact de la modification de la forme des motifs souhaités sur la source et sur la fenêtre de procédé. La forme initiale des motifs en gris donne une première source ainsi qu’une première fenêtre de procédé. En modifiant cette forme de motifs pour la rendre plus facilement réalisable en lithographie, comme représenté en bleu, une nouvelle source peut être obtenue et une fenêtre de procédé plus importante en découle.

En effet, l’utilisation d’un processus basé sur l’image aérienne et non itératif nous permet une obtention rapide des résultats. Ce processus, ainsi que les explications associées peut être décrit comme suit :

- Afin d’augmenter la résistance du procédé au défocus, il est important que, au point de limite d’impression, l’intensité lumineuse ne soit pas ou peu impactée par un changement de valeur de focus. Si ce point de limite d’impression est situé sur un point dit isofocal¹, alors cette condition est respectée puisque l’intensité ne bouge pas lors d’une modification de focus. Le procédé est donc très résistant au défocus.
- Il est possible lors d’un retargeting de déplacer le point de limite d’impression, celui-ci étant situé en théorie sur, ou très près, des contours de la target. En déplaçant la target vers un point isofocal proche, il est donc possible d’augmenter la résistance du procédé vis à vis du défocus.
- Il apparaît que certains bords ne sont pas situés proches de points isofocaux. La résistance de ces bords peut alors être renforcée, non plus au défocus mais à la

¹. Un point isofocal est un point où les courbes d’intensités lumineuse tracées pour différentes valeurs de focus se croisent.

variation d'intensité lumineuse appelée dose.

- Pour ce faire, il est nécessaire qu'au point de limite d'impression, la pente soit maximale. En effet si la dose varie, elle se retrouvera décalée sans que la valeur de la constante de résine Threshold ne soit modifiée. Plus la valeur de la pente est grande, moins ce décalage de l'intensité n'aura d'impact sur l'endroit où les deux courbes vont se croiser. Ainsi, la résistance à la variation de dose sera meilleure.
- Il est ainsi possible lors du retargeting, pour les motifs n'étant pas situés près de points isofocaux, de décaler les bords de ces motifs afin que ces derniers se retrouvent sur un point où la pente d'intensité est maximale.

Il résulte de ce processus de modification de la forme des motifs une nouvelle target qui devrait être plus résistante au procédé. Cependant, afin de pouvoir créer cette nouvelle target, il est important de modifier l'OPC. En effet, sans cette modification, la forme du masque resterait identique et la nouvelle target ne s'imprimerait pas. L'ensemble du procédé peut être représenté sur les graphiques 6.6 et 6.7.

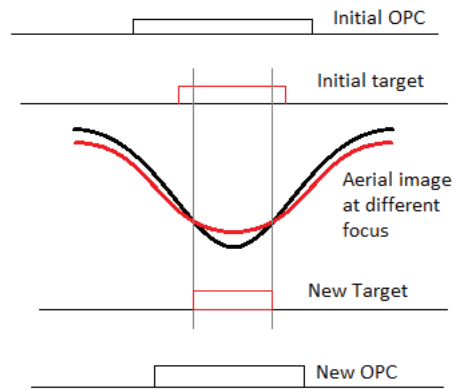


FIGURE 6.6 – Illustration du retargeting model based développé durant cette thèse. Pour un motif simple (ici une ligne vue en coupe) possédant un OPC associé, il est possible de tracer les images aériennes en intensité pour différentes valeurs de focus. Les deux courbes se croisant en un point isofocal, les bords de la target du motif peuvent être déplacés dans un processus de retargeting jusqu'à concorder avec les points isofocaux. Un nouvel OPC doit alors être calculé afin de pouvoir réaliser cette nouvelle target.

Un tel retargeting est basé sur les simulations des images aériennes et lié au modèle optique utilisé. Il prend donc en considération la source optique et en dépend au sens où chaque source différente va donner des images aériennes différentes et donc une target différente.

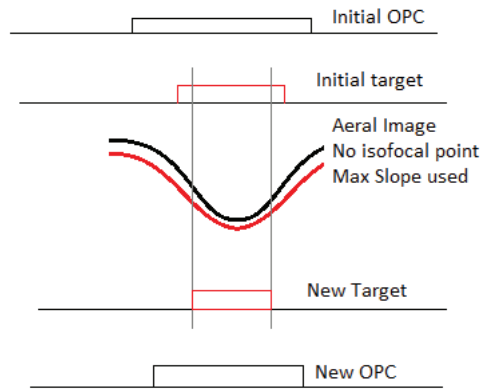


FIGURE 6.7 – De la même façon, si un motif ne donne pas de point iso-focaux, il est possible de déplacer les bords de ce motifs jusqu’au point possédant la pente maximale sur l’image aérienne à focus nominal. De la même façon, un OPC doit être effectué après.

6.4.3 Source Mask Target Optimization : le processus SMT0

Il apparait ainsi que la forme de la source dépend de la forme des motifs souhaités après une modification basée sur le modèle, et que la forme des motifs souhaités dépend de la forme de la source. Cette co-dépendance peut alors être utilisée dans un processus itératif d’optimisation à la fois de la forme de la target et de la forme de la source.

Ce processus itératif est assez similaire au procédé de cooptimisation de la source et de l’OPC décrit dans la section précédente, à la différence près qu’une étape de modification de la target d’après le procédé décrit ci-dessus et basée sur le modèle est introduite entre l’étape d’OPC et l’étape d’optimisation de la source. Ce processus peut alors être schématisé comme suit.

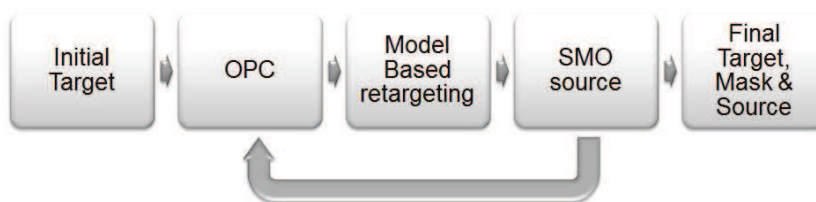


FIGURE 6.8 – Illustration du procédé SMT0.

Un aspect de vérification des connectiques électriques doit également être pris en compte. En effet, lors du déplacement des bords des motifs à imprimer, il est important de vérifier que les motifs déplacés gardent leurs interactions avec les niveaux

supérieurs et inférieurs, sans quoi les contacts électriques vont se perdre et le produit final ne pourra plus fonctionner. Une étape de vérification va être mise en place lors du retargeting afin d'éviter que ces contacts électriques ne diminuent en dessous d'une certaine taille. De même, il est important que des tailles minimales soient respectées pour certains types de motifs.

Le principe de l'ORC peut alors être appliqué à la forme finale des motifs afin de vérifier que ces derniers répondent bien aux spécifications électriques du produit. Par exemple, une ligne trop fine ne pourra pas faire passer correctement le courant. En appliquant le même principe que pour les ORC, non plus sur l'image résine mais sur la target, il est possible de limiter l'apparition de ces problèmes.

Une solution alternative peut également être utilisée en forçant la target à inclure tout ou partie de la target initiale. En effet, si elle comprend ce design initial, la target finale possèdera au minimum les propriétés électriques de cette dernière. Cette solution simple et rapide est bien plus facile à mettre en œuvre que le contrôle par ORC et elle a été utilisée pour des exemples présentés dans cette section.

Enfin, après un nombre suffisant d'itérations, comprenant l'OPC, le retargeting et les vérifications, ainsi que l'optimisation de la source, le processus est arrêté et un ensemble masque, source et target est obtenu.

6.4.4 Résultats

La technique SMTO étant une technique empirique, elle est basée sur des présuppositions et demande donc à être vérifiée. En effet, les sous-sections précédentes ne présentaient que l'approche théorique de la méthode, et les résultats pratiques doivent être étudiés pour mesurer le gain apporté par ce processus. De plus, le nombre d'itérations nécessaire pour une convergence des résultats est à ce stade inconnu.

Afin de démontrer à la fois le gain en termes de performance lithographique et la convergence du procédé, un ensemble de motifs à une dimension et de pas de réseaux irréguliers a été étudié. Le procédé SMTO a ainsi été appliqué et les résultats en termes de profondeur de champs sont représentés sur la figure 6.9 en fonction du nombre d'itérations. Il est possible de constater sur ce graphique que le retargeting rule based offre un gain en process window qui est loin d'être négligeable. C'est une étape nécessaire dans la lithographie et dans l'étape d'optimisation de la source. Toutefois, la forme des motifs peut encore être optimisée. La technique de cooptimisation source masque target permet d'augmenter encore la taille de la profondeur de champs de près de 30%. Le nombre d'itérations nécessaire à la convergence est ici de l'ordre de la dizaine. Cependant cette règle n'est pas nécessairement vraie et devrait être mise à l'épreuve pour chaque motifs étudié. La figure 6.10 présente les résultats après le premier retargeting rule based et la target finale après SMTO.

Finalement, le procédé a pu être utilisé sur des structures plus complexes de type logique à deux dimensions. Les résultats présentés sur la figure 6.11 rendent compte d'un exemple d'utilisation du procédé SMTO sur une structure à deux dimensions. Les targets après un retargeting rule based et SMTO sont représentées avec le design

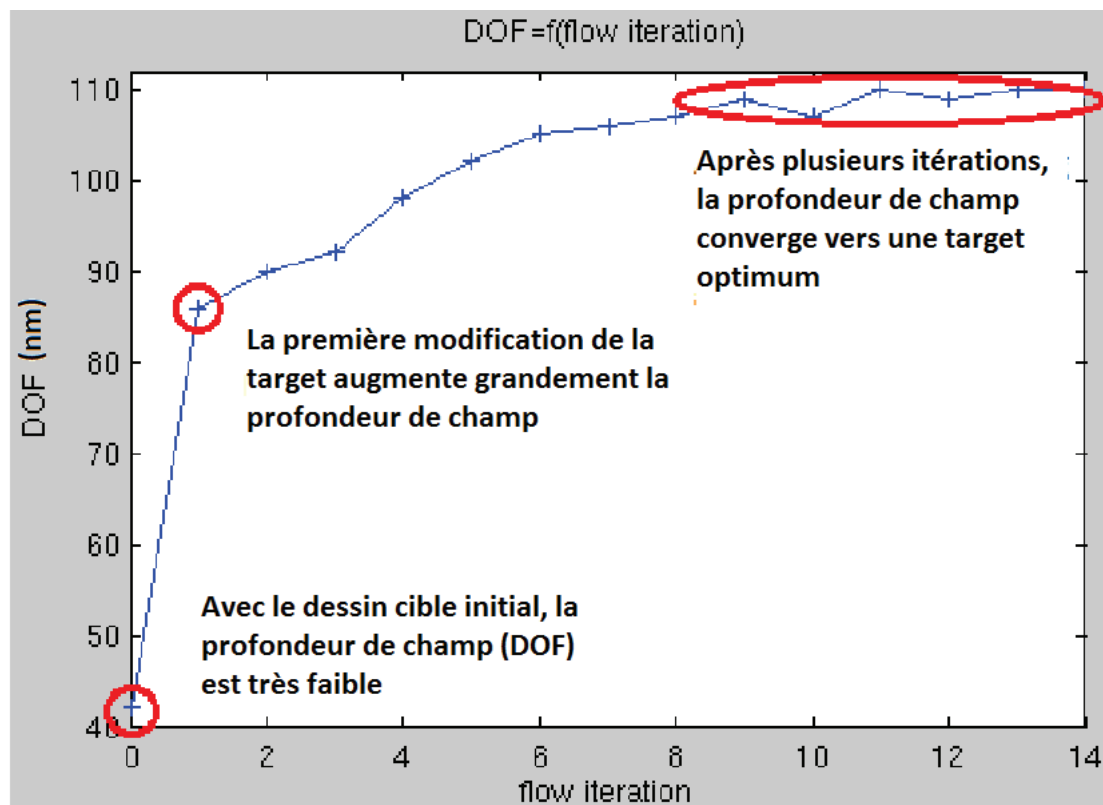


FIGURE 6.9 – Evolution de la taille de la profondeur de champ en fonction du nombre d'itérations du procédé SMT0. La première itération illustrant le retargeting rule based peut être largement améliorée au terme d'une dizaine d'itérations SMT0.

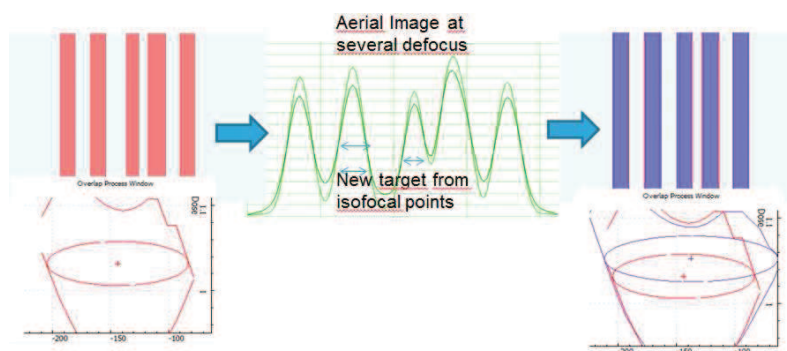


FIGURE 6.10 – Images des structures optimisées avant et après le processus SMT0.

initial. Il est possible de constater aisément que la fenêtre de procédé est très largement augmentée après l'utilisation du procédé SMT0.

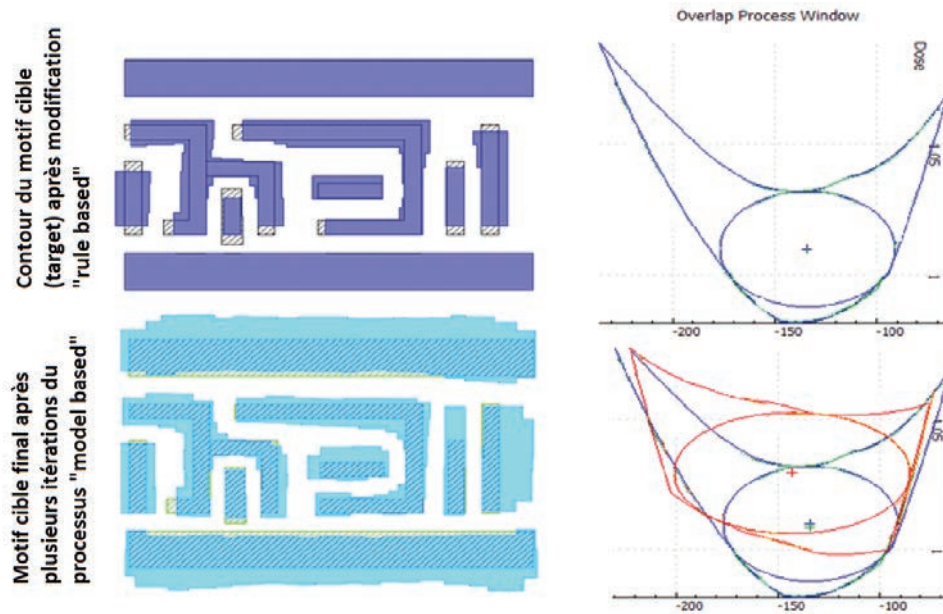


FIGURE 6.11 – Exemple d'application du processus SMT0 sur une structure à deux dimensions. Les targets, initiale en bleu foncé, et finale en bleu clair sont différente du design initial gris. Ces targets sont associées à deux fenêtres de procédé distinctes. Le gain apporté par le procédé SMT0 est ici parfaitement illustré.

Un tel processus présente cependant un inconvénient majeur en ce qui concerne le temps de calcul. En effet, lors d'un procédé classique d'optimisation de la source, le temps de calcul est déjà considéré comme très long par rapport au temps de calcul d'un OPC standard. Dans l'utilisation de ce processus, la source est optimisée une dizaine de fois de par sa nature itérative. Le temps de calcul est donc très important et freine grandement le développement et l'application d'un tel processus à l'échelle industrielle.

Conclusion

A l'heure où le retard accumulé quant à l'arrivée de la technique d'extrême UV, sensée remplacer les scanners avec une longueur d'onde de 193nm devient de plus en plus problématique, l'industrie cherche un second souffle grâce à toute une panoplie de nouvelles méthodes et astuces, afin de continuer à minimiser la taille des transistors. Cette bataille à laquelle nous assistons tous les jours sans même nous en rendre compte, en achetant notre smartphone, notre ordinateur, notre télévision est cependant de plus en plus difficile à mener. Les fabricants de puce CMOS doivent redoubler d'ingéniosité quant aux techniques utilisées afin de rester compétitif, et afin de rester fidèle aux prévisions de la "roadmap" pour les semi-conducteurs, "roadmap" basé sur la loi empirique de Moore. En effet, malgré l'arrivée très récente des outils basé sur l'extrême UV chez les plus gros fabricants, les outils basé sur la longueur d'onde à 193nm commencent à toucher à leur limite quant à leur capacité à graver toujours plus petit. La technologie devient petit à petit obsolète, et les industrielles doivent redoubler d'ingéniosité pour retarder cette obsolescence programmée.

Parmi ces techniques plus ou moins compliqué à mettre en place, et plus ou moins applicable à grande échelle, la technique de l'utilisation d'une source située en dehors de l'axe optique a déjà été adopté depuis plusieurs générations de technologie. Bien que jusqu'à présent peu comprise, elle a prouvé depuis longtemps son utilité, que ça soit sur un point de vue pratique comme théorique, en permettant de diviser la taille minimale des motifs à imprimer par jusqu'à un facteur deux.

Mais l'arrivée aujourd'hui de nouveaux outils aussi bien en terme de machine que au niveau des vitesses de calcul, a permis de pousser l'exploitation de cette technique encore plus loin. En effet, la compagnie ASML, qui vend près de 90

Ces questions et cette nouvelle technique à soulever au sein de l'entreprise STMicroelectronics des questions et des interrogations. En effet, si l'utilisation de sources hors axe lors du procédé de lithographie optique a déjà été démontrée et vérifiée, il n'en était alors rien pour les sources plus complexes. De plus, quel allait être la réponse de la qualité de la lithographie quant à cette nouvelle technique. Suite à ces questions, et à peu près en même temps que la société tentait de s'approprier leur première machine utilisant l'outil flexray, le travail de cette thèse a pu commencer.

Ainsi, durant ces trois années de thèse, l'apprentissage des techniques tournant autour de la lithographie optique, ainsi que leur mise en relation avec la technique de modification de la source optique a pu être réalisé au sein de STMicroelectronics. La démonstration théorique de l'efficacité de la méthode d'utilisation d'une source lu-

mineuse située en dehors de l'axe optique a ensuite été refaite et approfondi. Cette technique théorique a également permis de faire le lien entre le cas simple d'une illumination hors axe ponctuelle, et la qualité des résultats en terme industriel. En effet, les contraintes de l'industrie se basent sur des mesures et des marges de tolérance, là où l'académicien se limite aux équations, et réussir à faire le lien entre les équations et l'application n'est pas toujours tâche aisée. Cependant, la démonstration de l'utilisation d'une source complexe, composé de différentes parties situées plus ou moins en dehors de l'axe optique, possédant chacune une intensité lumineuse et une forme particulière a pu être démontrée. Un panel de technique original a également été développé et présenté afin de permettre une meilleure compréhension de la source et des implications qu'apportent sa modification.

La technique d'optimisation des sources est aujourd'hui de plus en plus répandue au sein de l'industrie du semi-conducteur. En effet, afin de permettre à la lithographie par immersion de continuer la cadence imposé par les lois économiques, cette dernière doit être utilisé sur les niveaux les plus avancés des technologies 28nm et inférieur, en supplément de nombreuses autres techniques tels que l'OPC, la double exposition ou encore les résines optimisées.

Cependant la lithographie à immersion est aujourd'hui à bout de souffle et ne pourra pas permettre de continuer la diminution de la taille des motifs critiques. La technique d'extrême UV va bientôt prendre le relais, les premières machines étant à l'heure actuelle en cours d'installation chez divers gros acteur de l'industrie du semi-conducteur. Il peut alors sembler déjà obsolète de se pencher encore sur la question de l'optimisation de la source lumineuse. Il n'est en réalité rien, et ce pour deux raisons. La première est que, comme c'est le cas actuellement pour les scanners utilisant une longueur d'onde de 248nm, les techniques utilisés aujourd'hui pour produire les niveaux les plus avancé resteront utilisé sur les prochains n?uds afin de produire les niveaux moins compliqué. En effet, il n'est pas nécessaire que tous les niveaux soient gravés au plus fin possible. Mais enfin et surtout, la technique d'optimisation de la source optique est encore tout à fait valable dans le domaine de l'extrême UV. Si jamais les sources EUV arrivent à produire suffisamment d'énergie, tel qu'annoncé par la compagnie ASML, les sources utilisées devront être également pensé et optimisé. Un module équivalent à Flexray est déjà en cours de conceptualisation au sein d'ASML pour les prochaines générations de scanner à extrême UV.

L'étude de la modification de la source dans l'utilisation de la méthode de cooptimisation source/masque en lithographie optique est donc encore une technique d'avenir, et sa maitrise est aujourd'hui un point clef dans la course à la miniaturisation.

Bibliographie

- [1] The gilbert hyatt patent. *Patent No. 3,821,715*, filed January 1973, granted June 28, 1974.
- [2] Single chip integrated circuit computer architecture. *Patent 4942516*, 17 juillet 1990.
- [3] Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38, 19 avril 1965.
- [4] *An Introduction to Microcomputers. Volume 1 : Basic Concepts (2nd ed.)*. 1980.
- [5] *Optical Lithography*. SPIE Press, 2009.
- [6] *Mc MOS Handbook, Products-Characteristics-Applications, ch.3 : General CMOS characteristics*, chapter 3.1-3.11. Motorola Inc. Semiconductor Products Division, Octobre 1973.
- [7] *Microprocessors And Microcontrollers : Architecture Programming And System Design*. 2007.
- [8] PRNewsWire. Major us semiconductor maker chooses tma for opc software. *PR-NewsWire*, 16 octobre 1997.
- [9] T. Faggin, F. ; Klein. Insulated gate field effect transistor integrated circuits with silicon gates. In *International Electronic Devices Meeting*.
- [10] P. Gargini. The international technology roadmap for semiconductors (itrs), past, present and future. *IEEE p3-5 doi10.1109*, 2000.
- [11] *Lasers and Moore's Law*, chapter p. 20. SPIE Professional, oct. 2010.
- [12] *Ultrafast deep-UV lithography with excimer lasers*, chapter p.53. IEEE Electron Device Lett., 1982.
- [13] *Excimer Laser Lithography*. SPIE Press, 1990.
- [14] August Kohler. New method of illumination for photomicrographical purposes. *Journal of the Royal Microscopical Society*, 1894.

- [15] August Kohler. Ein neues beleuchtungsverfahren fur mikrophotographische zwecke. *Zeitschrift fur wissenschaftliche Mikroskopie und fur Mikroskopische Technik*, 1893.
- [16] *Resolution enhancement techniques in optical lithography*. SPIE Press, 2001.
- [17] [http://www.nikonprecision.com/newsletter/fall 2008/article 05.html](http://www.nikonprecision.com/newsletter/fall%202008/article%2005.html).
- [18] *Theorie des quatre mouvements et des destinees generales : prospectus et annonce de la decouverte*. 1841.
- [19] *The New Physical Optics Notebook : Tutorials in Fourier Optics*. SPIE Press, 1989.
- [20] Y. Fan L. Zavyalova N. Lafferty B. Smith, A. Bourov and F. Cropanese. Approaching the numerical aperture of water immersion lithography at 193-nm. In *Proc. SPIE*.
- [21] C. Grant Willson and Bernard J. Roman. The future of lithography : Sematech litho forum 2008. *ACS Nano*, 2(7) :1323–1328, 2008.
- [22] B. Lin. The attenuated phase-shifting mask. *SOL. STATE TECHNOL*, 1992.
- [23] <http://www.photomask.com/products/omog-masks>.
- [24] Shijian Zhang, Manhua Shen, Yao Xu, Qiang Wu, Yishih Lin, and Yiming Gu. Performance comparison between attenuated psm and opaque mosi on glass (omog) mask in sub-32nm litho process. *ECS Transactions*, 44(1) :249–256, 2012.
- [25] G. Shelden K. Kjoller M. McCallum, P. Gabella and E. Miller. Alternating psm mask performance : a study of multiple fabrication technique results. 2001.
- [26] K. Hashimoto F. Shigemitsu A. Nitayama, T. Sato and M. Nakase. New phase shifting mask with self-aligned phase shifters for a quarter micron photolithography,. *Electron Devices Meeting*, 1989.
- [27] R. SOCHA T. LAIDIG K. WAMPLER K. NAKAGAWA G. HUGHES S. MACDONALD J. Fung Chen, J. PETERSEN and W. NG. Binary halftone chromeless psm technology for lambda/4 optical lithography,. *SPIE Proc. serie*, 2001.
- [28] A. Reiser C. G. Willson, R. A. Dammel. Photoresist materials : A historical perspective. *SPIE*, 1997.
- [29] B. Mortini. *These : Etude des resines photolithographiques positives 193nm Å amplification chimique et mise au point de leurs conditions de procede*. PhD thesis, Grenoble : Universite de Joseph Fourier, 2001.
- [30] [http://www.asml.com/doclib/productandservices/images/2012/asml 20120529 asml images spring edition-2012.pdf](http://www.asml.com/doclib/productandservices/images/2012/asml%20120529%20asml%20images%20spring%20edition-2012.pdf).

-
- [31] Pei-yang Yan. Understanding bossung curve asymmetry and focus shift effect in euv lithography. pages 279–287, 2002.
 - [32] Yiwei Yang et al. A kernel-based dfm model for process from layout to wafer. *proc SPIE 7641*, Design for Manufacturability through Design-Process Integration IV, 76410O ; doi :10.1117/12.844671, 2 avril 2010.
 - [33] C. Mac. Enhanced lumped parameter model for lithography. *Proc. of SPIE*, vol 2197, p501-510, 1994.
 - [34] L. Capodiecì. Optimization techniques for vlsi modeling and tcad in semiconductor manufacturing. *PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison*, 1996.
 - [35] F. H. Dill et al. Modeling projection printing of positive photoresists. *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol ED-22, p456-464, 1975.
 - [36] N. Cobb. Fast optical and process proximity correction algorithms for integrated circuit manufacturing. *PhD thesis, University of California Berkeley*, 1998.
 - [37] Experimental results on optical proximity correction with variable-threshold resist model.
 - [38] N. Cobb et al. Mathematical and cad framework for proximity correction. *proc of SPIE*, 2726, p208-221, 1995.
 - [39] Linyong Pang et al. Inverse lithography technology (ilt), what is the impact to-photomask industry? *Proc. SPIE 6283*, 18 avril 2006.
 - [40] *Fundamental Principles of Optical Lithography : The Science of Microfabrication*. Wiley, 2011.
 - [41] Robert Socha. Source and mask optimization. *Brevet 10/813,626, Nb publi :US 2004/0265707 A1*, 31 mars 2004.
 - [42] Robert Socha, Xuelong Shi, and David LeHoty. Simultaneous source mask optimization (smo). pages 180–193, 2005.
 - [43] Guangming Xiao, Tom Cecil, Linyong Pang, Bob Gleason, and John McCarty. Source optimization and mask design to minimize meef in low k1 lithography. pages 70280T–70280T–11, 2008.
 - [44] Linyong Pang, Guangming Xiao, Vikram Tolani, Peter Hu, Thomas Cecil, Thuc Dam, Ki-Ho Baik, and Bob Gleason. Considering meef in inverse lithography technology (ilt) and source mask optimization (smo). pages 71221W–71221W–14, 2008.

- [45] Stephen Hsu, Luoqi Chen, Zhipan Li, Sean Park, Keith Gronlund, Hua-Yu Liu, Neal Callan, Robert Socha, and Steve Hansen. An innovative source-mask co-optimization (smo) method for extending low k1 imaging. pages 714010–714010–10, 2008.
- [46] Alan E. Rosenbluth, David O. Melville, Kehan Tian, Saeed Bagheri, Jaione Tirapu-Azpiroz, Kafai Lai, Andreas Waechter, Tadanobu Inoue, Laszlo Ladanyi, Francisco Barahona, Katya Scheinberg, Masaharu Sakamoto, Hidemasa Muta, Emily Gallagher, Tom Faure, Michael Hibbs, Alexander Tritchkov, and Yuri Granik. Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography. pages 727409–727409–15, 2009.
- [47] Tomoyuki Matsuyama, Toshiharu Nakashima, and Tomoya Noda. A study of source and mask optimization for arf scanners. pages 727408–727408–8, 2009.
- [48] Abani Biswas and Steven R. J. Brueck. Simulation of the 45 nm half-pitch node with 193 nm immersion lithography imaging interferometric lithography and dipole illumination. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 3(1) :35–43, 2004.
- [49] Sabita Roy, Doug Van Den Broeke, J. Fung Chen, Armin Liebchen, Ting Chen, Stephen Hsu, Xuelong Shi, and Robert Socha. Extending aggressive low-k1 design rule requirements for 90 and 65 nm nodes via simultaneous optimization of numerical aperture, illumination and optical proximity correction. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 4(2) :023003–023003–10, 2005.
- [50] Joost Bekaert, Bart Laenens, Staf Verhaegen, Lieve Van Look, Darko Trivkovic, Frederic Lazzarino, Geert Vandenberghe, Paul van Adrichem, Robert Socha, Stephen Hsu, Hua-Yu Liu, Orion Mouraille, Koen Schreel, Mircea Dusa, Jorg Zimmermann, Paul Graupner, and Jens Timo Neumann. Experimental verification of source-mask optimization and freeform illumination for 22-nm node static random access memory cells. *Journal of Micro and Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 10(1) :013008–013008–10, 2011.

A systematic study of source error in source mask optimization

C. Alleaume^a, E. Yesilada^a, V. Farys^a, L. Depre^b, V. Arnoux^b, Zhipan Li^b, Y. Trouiller^c, A. Serebryakov^d

^a STMicroelectronics - 850 rue Jean Monnet, F 38926 Crolles Cedex, France

^b Brion Technologies, Inc., 4211 Burton Drive, Santa Clara, CA, USA 95054

^c CEA-Leti, 17 Rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France

^d ASML De Run 6501, NL 5504 DR, Veldhoven, The Netherlands

email : clovis.alleaume@st.com

ABSTRACT

Source Mask Optimization (SMO) technique is an advanced RET with the goal of extending optical lithography lifetime by enabling low k₁ imaging [1,2]. Most of the literature concerning SMO has so far focused on PV (process variation) band, MEEF and PW (process window) aspects to judge the performance of the optimization as in traditional OPC [3]. In analogy to MEEF impact for low k₁ imaging we investigate the source error impact as SMO sources can have rather complicated forms depending on the degree of freedom allowed during optimization.

For this study we use Tachyon SMO tool on a 22nm metal design test case. A free form and parametric source solutions are obtained using MEEF and PW requirements as main criteria. For each type of source, a source perturbation is introduced to study the impact on lithography performance. Based on the findings we conclude on the choice of freeform or parametric as a source and the importance of source error in the optimization process.

Keyword:

Source mask optimization; SMO; source error; freeform; parametric; PV band; degraded source

I. INTRODUCTION

The goal of source mask optimization (SMO) is to increase the resolution and the process latitude in optic lithography, by using a non standard source like parametric or freeform. Several software, like Tachyon SMO from Brion, manage to co-optimize the mask and the source shape in that purpose. Therefore, for each different design, we obtain an optimum duo: mask and source. We can place constraints such as symmetry or parametric output to force a preferential source type during such optimization. However, the resulting sources can be sufficiently complicated that a study on the systematic source errors is well merited.

Today the impact of mask writing errors [4] [5] as well as dose and focus variations [6] [7] are regularly checked to define the robustness of process. The idea of our study is to find a way to predict and measure the impact of a potential modification of the source. See if and how this may in turn influence the process.

II. NON IDEAL SOURCE

In SMO, the source is no more generated by a classical DOE, but from a complex set of mirrors, like in Flexray technology from ASML [8,9]. A source generated from such a complex optical system will naturally exhibit differences from an ideal source due to limited size of pixels. Therefore, we use a pupil predictor to generate a target source from an ideal source. We can then measure the physical source on the tool and compare it to the target source as shown in Fig1. Our study focuses on analyzing the differences between the target and measured sources and determine their impact on the resist image if any.

In order to further explore potential impact of source variations we artificially induce perturbations on an ideal source and compare them along with the measured source to the ideal source. For this work the c-quadrant source used to generate the sources shown in Fig. 1 was modified using following perturbations

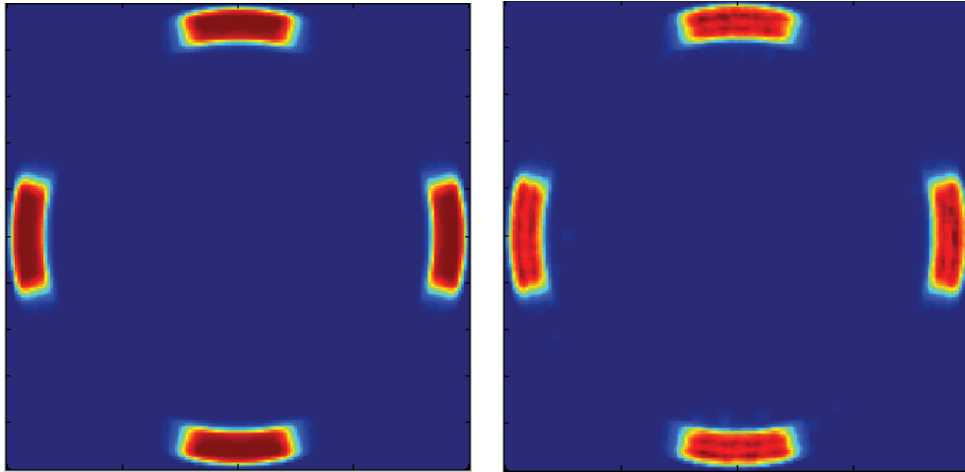


Fig.1 : (a) Target source (b) Measured source

- Original source convolute by a Gaussian with $\sigma_g = 0.1 \times \sigma_{\max}$ and 0.2 (σ_g : variance of the Gaussian, and σ_{\max} : max radius of the source)
- Original source with random noise of 0.5% and 1% of max intensity
- Scale or offset the source by 1% or 2%

The different types of perturbations are shown in Fig. 2 with exaggerated magnitudes in order to help visualize their impact on the source. In figure 3 we also show differences in the intensity of the pupil between a) a measured and an ideal c-quad source, b) a Gaussian convoluted and ideal parametric source and c) a scaled and ideal freeform source. We then need to assess how much these perturbed sources differ from the ideal source i.e; if the differences are comparable to the ones seen on a measured source. In that purpose, we used an ASML tool, which can decompose the differences between the ideal source and the measured or modified one into a sequel of Pupil Fit Model parameter (see fig.3) [10]. We decomposed the differences from our modified sources, and compared those to the parameters from a measured pupil as plotted in Fig. 4

We can see that while the variations between the measured and 1% noise induced source fall within the machine specs whereas the other sources show higher magnitude of variation compared to the measured source or the machine targets. Nevertheless, we have included all of the mentioned sources in our study in order to analyze their impact.

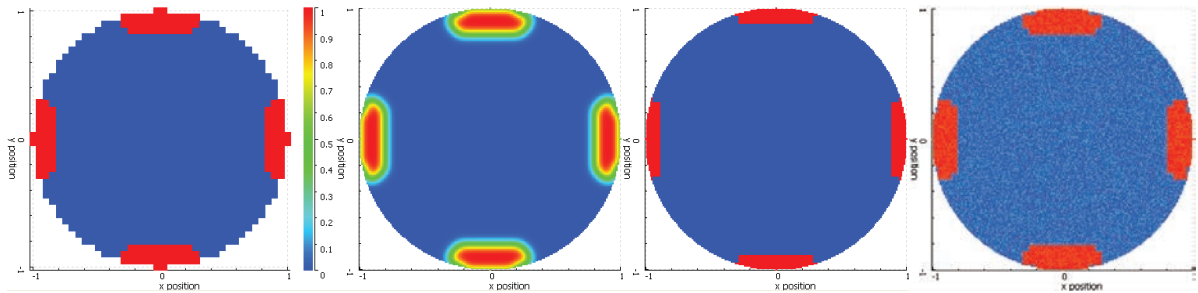


Fig.2 : (a) Top-hat source (b) Convolute by Gaussian (c) Offset the source (d) Source with random noise
Effect is exaggerated for visualization.

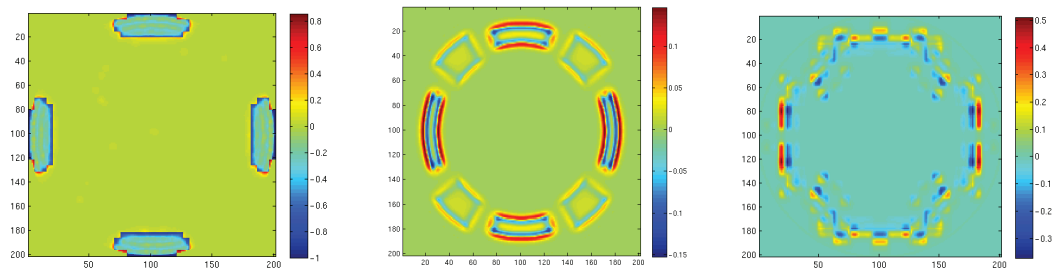


Fig.3: (a) Differences between original source and measured source for the c-quad
(b) Differences between the Gaus0.1 source and the original one for a parametric source
(c) Difference between the source scale by 1% and the original source.

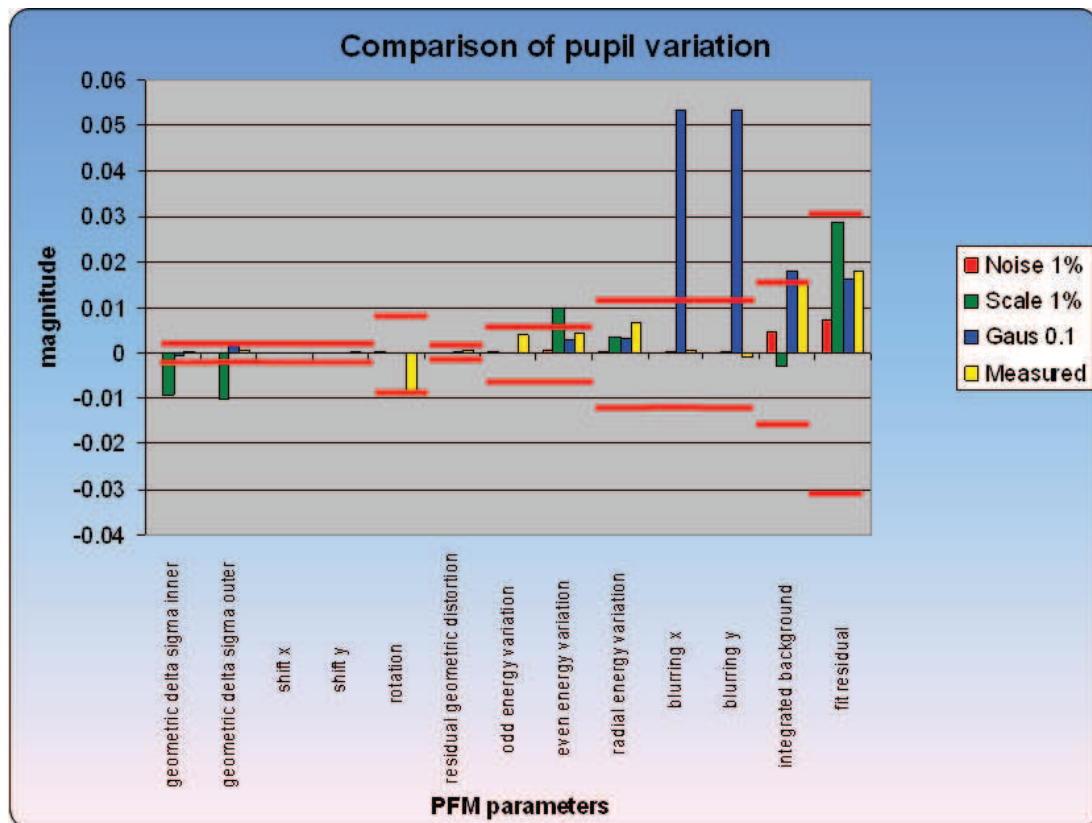


Fig.4: Plot showing PFM parameters. The red lines represent machine targets. The measured and 1% noise perturbation exhibit variations that are within specs

III. IMPACT ON A SIMPLE TESTCASE: CONTACT ARRAY

In order to evaluate the impact of source variation on the process we selected two criteria. One is the resist image CD at nominal condition; the other is the PV band width for a defined process window (see table 1). For each of the criteria we compare the results from an ideal source to the modified or measured sources as shown in Fig. 5. Each criteria is evaluated at several locations on the selected test case.

Bias (nm)	0	-0.25	0.25	-0.25	0.25	-0.25	0.25	-0.25	0.25
D Focus (nm)	0	-25	-25	25	25	-25	-25	25	25
D Dose (%)	0	-3	-3	-3	-3	3	3	3	3

Table 1: Process window used in this study

The first test case, constitutes a contact array with 40nm CD and 80nm pitch along the y axis and 60nm CD and 120nm pitch along the x axis (fig.6).

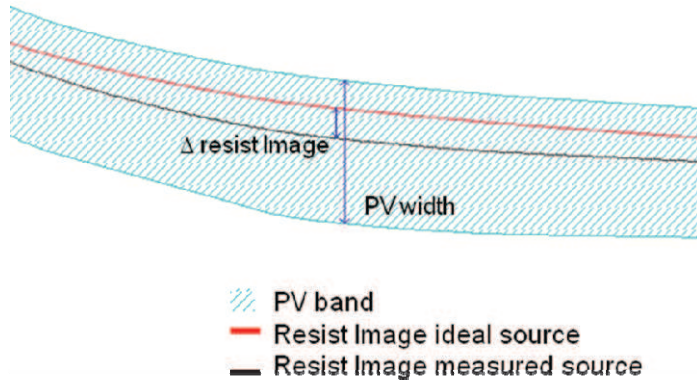


Fig.5: Illustration of the PV band width and the resist image position variation; here on two points, x and y.

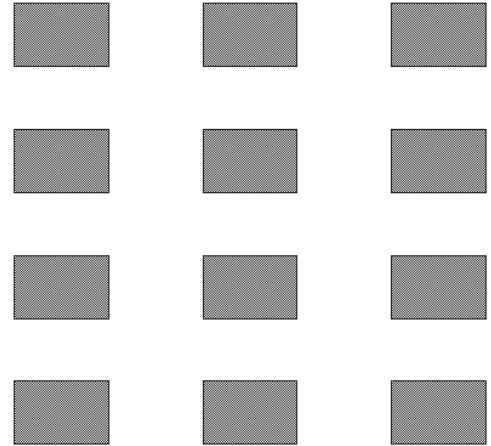


Fig.6: Simple test case design used in preliminary study

Fig.7 shows the contour CD and PV Band impact resulting from extreme (non realistic) source perturbation. However, for the source perturbations depicted in Fig. 4, the impact of variations are less readily tangible and observable. We measured the simulated PV band and the simulated resist image CD resulting from these sources along the x and y directions of the contacts. The differences with respect to the ideal source are plotted in Fig. 8 and Fig.9.

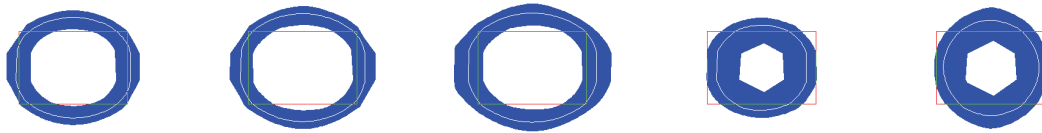


Fig.7 PV band for: (a) Top-hat source (b) Real source (c) Gaus0.2 (d) Noise 5% (e) Scale 10%

From these figures we can see how different type of perturbations impact the resist contour CD as well as the PV Band. We conclude this simple test case study by noting that for the measured and small realistic perturbations as depicted in Fig. 4 the differences in variations remains less than 5% of the design CDs.

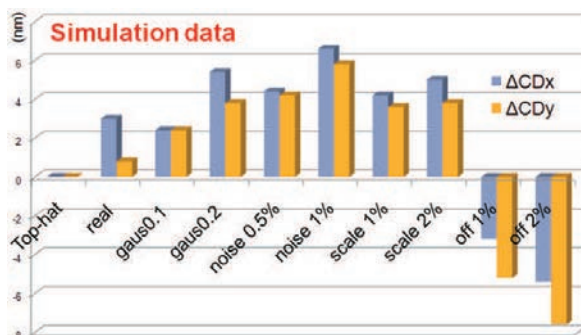


Fig.8: CD variation regarding of the degradation type.

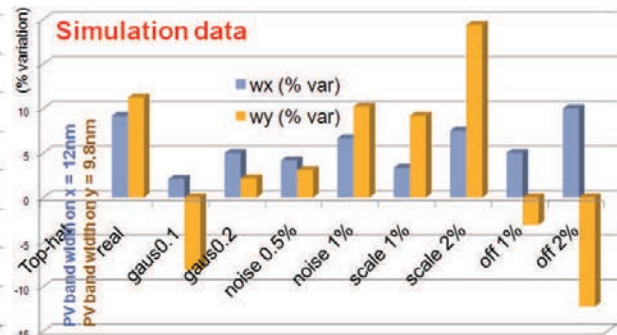


Fig.9: PV band width variation in % compare to the PV band width with original source.

IV. A COMPLEX TESTCASE: LOGIC DESIGN

We continue our analysis on a more complex logic layout (fig.10). First, Tachyon SMO was used to obtain two optimized sources, one freeform and one parametric, both with D2 symmetry (fig.11) for this layout.

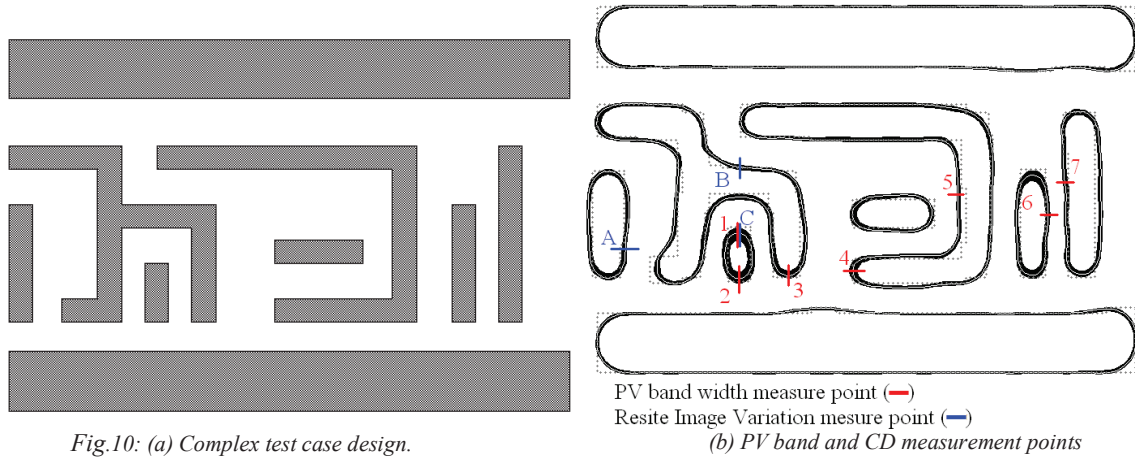


Fig.10: (a) Complex test case design.

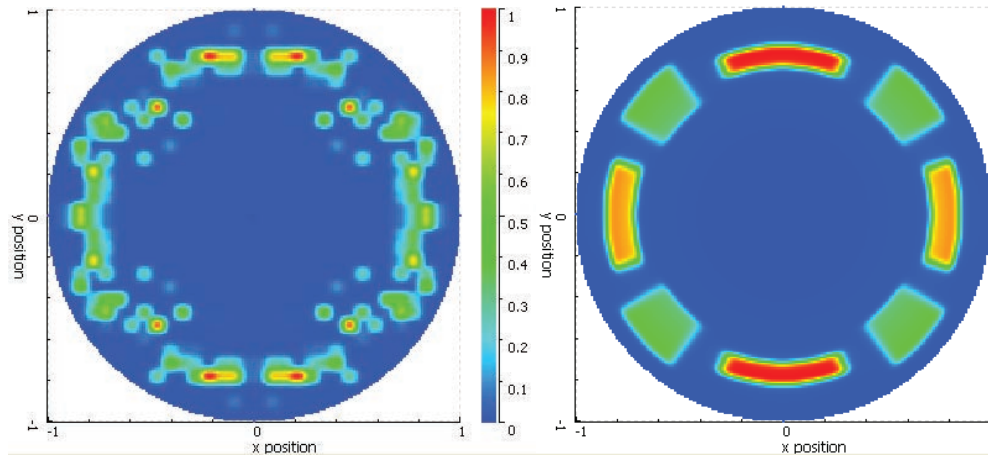


Fig.11: (a) Freeform source obtain for the complex design (b) Parametric source.

Each of the sources was perturbed as in the previous section. Next we studied resist contour and PV band resulting from each source. Several gauges were used as shown in Fig. 10 to measure the resist contour CD and PV band variation. We then measure and compare the results from the perturbed sources to their respective original sources. As previously, the PV band width differences are shown in % variation compared to the PV band widths resulting from the original source

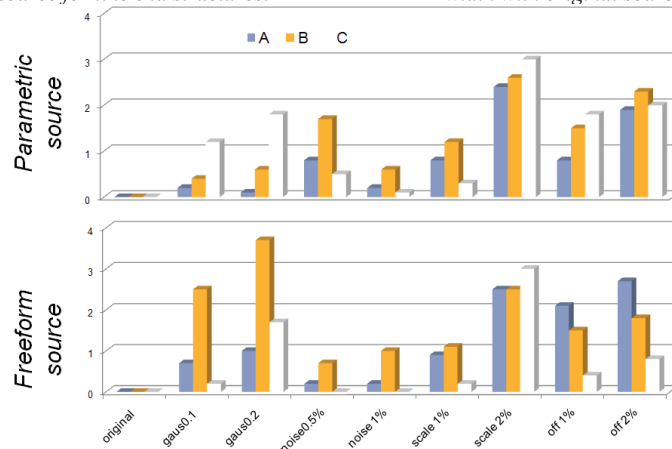
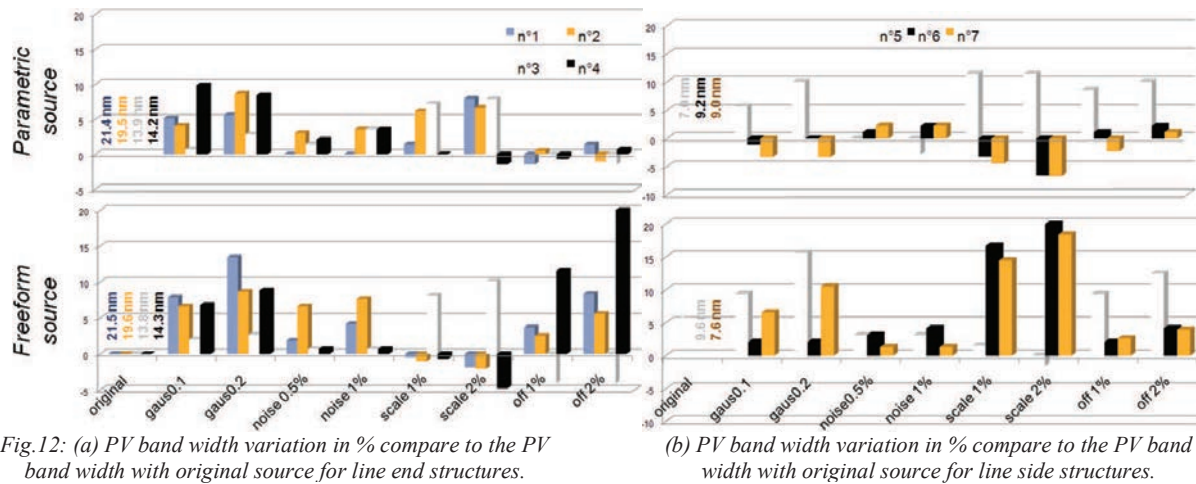


Fig.13: Resist image variation in nm regarding of the source degradation type.

Once again, we observe the modulation of CD variation (fig.13) and the PV band width (fig.12) as a function of the type and magnitude of perturbation.

We also notice that the freeform source is more sensitive to source degradations than the parametric one. Also, on Resist Image Variation, the Gaussian and random noise seems better for parametric source.

V. EXPERIMENT: MONITORING REAL FLEXRAY PERFORMANCE

After studying the source variation impacts theoretically, we would like to see if, on practice, they are appropriate. Therefore, in order to investigate the real pupil performance we performed the following pupil qualifications:

- FlexRay accuracy for pupil target matching; which was already shown at the beginning of our study. We had seen that we can decompose the difference between the target source and the measured source into a sequel of Pupil Fit Model [10] in order to see if it is within the specifications, and to compare it to other pupils.
- CD impact of the FlexRay accuracy for pupil target matching. Same analysis as in figure 8 for real top-hat source, but in this case with a freeform source, and for a bigger set of case.
- FlexRay stability monitoring through several days.

A set of simple 1D CD versus pitch and 2D line end structures were used for the study. First, we simulated CD difference for the target pupil and the real measured one. as shown in fig.14. As we can see from the results the CD variations remain within the supplier specifications.

We also wanted to test the reproducibility of the source. On a Flexray scanner, we use a sequel of different sources, and measure the source each time the wanted freeform source was generated on the tool. Then, for the same test structures as before, we simulate the variation CD between the first measured source and the other measured sources. The results are shown on fig.15. As we can see, the source doesn't change much each time it is generated, as the CD impact remain really small (less than 0.1nm).

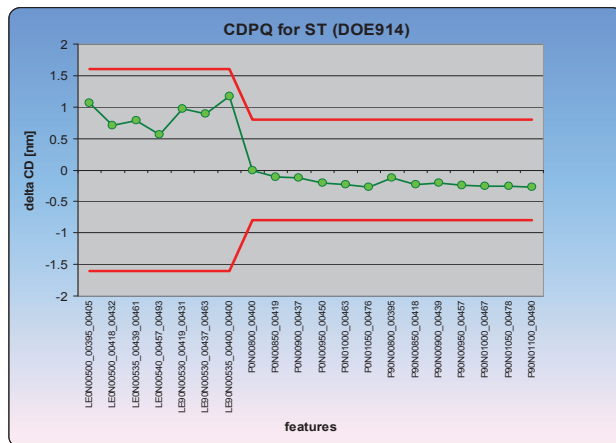


Fig.14: Simulation CD variation for 1D and 2D structure with target pupil versus measured one.

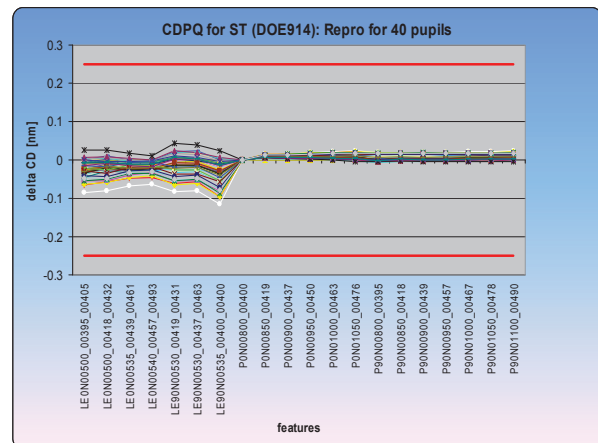


Fig.15: Simulation CD variation for several measured pupils. Measures are made within several days, and the source is change between each measure.

VI. DISCUSSION AND PERSPECTIVE

As we had shown, the pupil deterioration can be easily measured, and/or artificially generated, in order to predict the impact of such deteriorated source. We have introduced an easy way to measure the impact of those modified pupils, by looking at the image resist placement and the PV band width.

We can now easily predict the sensitivity of a source resulting from SMO.

We also had shown that a parametric pupil is less sensitive to deformation than a freeform source.

We have also observed that a target pupil generation can be sufficient to calculate accurate resist contours as differences with respect to a measured source are within specifications.

Finally, we had shown that the reproducibility of the source is not an issue as resulting CD variations are negligible. Therefore, a single source measurement should be sufficient to build stable OPC models. Works are currently under going to see if the source is also stable through different FlexRay scanner, as it is through time on a single tool.

- [1]. Alan E. Rosenbluth, et al. "Optimum mask and source patterns to print a given shape", SPIE Vol. 4346, pp 486-502 (2001)
- [2]. Alan E. Rosenbluth et al. "Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography", SPIE Vol. 7274, (2009)
- [3]. Stephen Hsu et al. "Source-mask co-optimization: optimize design for imaging and impact of source complexity on lithography performance." Proc of the SPIE, Vol 7520 (2009).
- [4]. J. Randall et al. "Reduction of Mesk induced CD errors by optical proximity correction", Proc. of SPIE vol 3334 pp103 (1998)
- [5]. F.Shellenberg, C. Mark "MEEF thery and practice", Proc of SPIE BACUS vol.3873 (1999)
- [6]. J.W. Bossunf, "Projection printing characterization", Proc of SPIE, vol 100, pp80-84 (1977)
- [7]. C.A Mack, "Understanding focus effect in submicron optical lithography. Part3: methods for depth of focus improvement", Proc of SPIE vol 1674, p272-284 (1992)
- [8]. M. Mulder et al., "Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems," Proc. of SPIE 7520, (2009)
- [9]. M. Mulder et al. "Performance of FlexRay, a fully programmable Illumination system for generation of Freeform Sources on high NA immersion systems", Proc of SPIE vol. 7640 (2010)
- [10]. Jin-hyuck Jeon et al, "Analysis of the impact of pupil shape variation by pupil fit modeling", Proc of SPIE vol. 7640 (2010)

Quantification of the difference between two sources by Zernike polynomial decomposition

C. Alleaume^a, E. Yesilada^a, V. Farys^a, Y. Trouiller^b

^a STMicroelectronics - 850 rue Jean Monnet, F 38926 Crolles Cedex, France

^b CEA-Leti, 17 Rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France
email: clovis.alleaume@st.com

Abstract

Source Mask Optimization (SMO) technique is an advanced resolution enhancement technique with the goal of extending optical lithography lifetime by enabling low k1 imaging [1,2]. On that purpose, an appropriate source and mask duo can be optimized for a given design.

SMO can yield freeform sources that can be realized to a good accuracy with optical systems such as the FlexRay [3]. However, it had been shown that even the smallest modification of the source can impact the wafer image or the process.[4] Therefore, the pupil has to be qualified, in order to measure the impact of any source deformation[5].

In this study we will introduce a new way to qualify the difference between sources, based on a Zernike polynomial decomposition [6]. Such a method can have several applications: from quantifying the scanner to scanner pupil difference, to comparing the source variation depending of the SMO settings etc. The straightforward Zernike polynomial decomposition allow us to identify some classic optical issues like coma or lens aberration.

Keyword: Source Mask Optimization, Source error, Zernike, Process Window

Introduction

Source Mask Optimization (SMO) technique is an advanced RET with the goal of extending optical lithography lifetime by enabling low k1 imaging. Most of the literature concerning SMO has so far focused on PV (process variation) band, MEEF and PW (process window) aspects to judge the performance of the optimization as in traditional OPC.

In analogy to MEEF impact for low k1 imaging we investigate the source error impact as SMO sources can have rather complicated forms depending on the degree of freedom allowed during optimization.

In this study, we measure the source variation using the Zernike polynomial decomposition by introducing the source distance notion between two sources. Then, we try to link this difference between two sources to the resulting process window variation.

1 Zernike polynomials

When using the source mask optimization method, we can easily obtain an illuminator map, depending on the software used, the settings chosen, or the design selected. However, for each optimization, the source could be slightly, or completely different. Such a difference in sources is usually compared without any mathematical tool. A mathematical tool based on Zernike polynomials could allow us to compare sources to each other, in a multitude of applications, such as comparing different optimization flows, comparing freeform and parametric sources, measuring the difference between top hat source and measured source, measuring the source variation through time or tool, etc... . The Zernike polynomials are a sequence of polynomials that are orthogonal on the unit disk. The Zernike polynomials are defined as:

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m\varphi) \quad (1)$$

For the even order, and:

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m\varphi) \quad (2)$$

For the odd orders, where m and n are nonnegative integers with $n \leq m$, φ is the azimuthal angle, and ρ is the radial distance $0 \leq \rho \leq 1$. The radial polynomials R_n^m are defined as:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k!((n+m)/2-k)!((n-m)/2-k)!} \rho^{n-2k} \quad (3)$$

for $n - m$ even, and are identically 0 for $n - m$ odd.

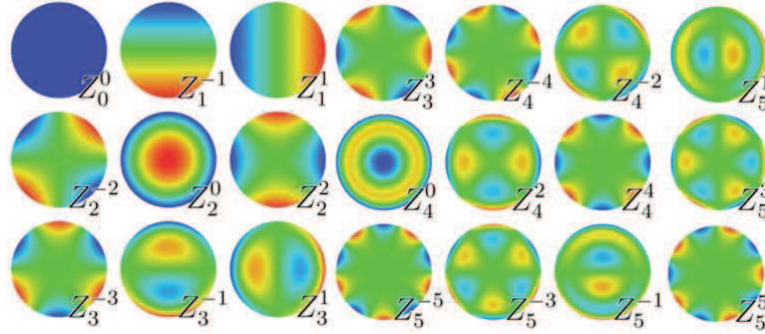


Figure 1: Graphic representation of the Zernike polynomials

For $m = 0$, the even definition is used which reduces to $R_0^0(\rho)$. As the Zernike polynomials are orthogonal, they are a base of a vector space define on the unique disc of an infinite dimension. Therefore, any function defined on the unit disk could be decomposed into an infinite sum of Zernike polynomial multiplied by a coefficient, which could be written as:

$$src = \sum_{n=0}^{k=+\infty} \sum_{m=0}^n C_{n,m} Z_n^m \quad (4)$$

Where Z_n^m is the Zernike polynomial of order n and m , and $C_{n,m}$ the coefficient of this polynomial. An infinite decomposition requires a regression algorithm for an infinite series. We can only decompose into a finite series. Therefore, we have to show that a limited series could also describe the source, without modifying its optical property. As in optical lithography, the goal is usually to increase the process window size, we have decided to compare the impact of the polynomial decomposition of the source on the process window. We compare the process window on a simple CD versus pitch pattern, for both the original source, and several different decompositions of the source. The different decompositions are made by modify the k value.

We have to keep in mind that the k value doesn't represent directly the number of Zernike coefficient we use for the decomposition. However, it is largely linked to it. In fact, in case we use all the coefficients, the number of coefficient regarding k value is:

$$\text{number polynomial} = \frac{(k+2)(k+1)}{2} \quad (5)$$

However, for many source, the symmetry of the source allow us to consider only the polynomials which have the same symmetry. In fact, if the source has a D2 symmetry, then the polynomials have to be D4 symmetrical. Therefore, only the even Zernike (m positive) have to be considered. If the source has a D4 symmetry, which is usually the case, only the even orders (m positive), with even values of m (and by extension of n) have to be considered. Finally, if our source has a D8 symmetry, only the even polynomials (m positive), with an m value as m equal 0 congruent modular four ($m \equiv 0 \pmod{4}$, or $m = 0 + a * 4$, $a \in \mathbb{N}$). We can reduce therefore significantly the decomposition process, and the run time, by selecting the proper symmetry.

We represent in the graph the normalized process window simulated with the decomposed source for different k values compared to the process window obtained for the original source.

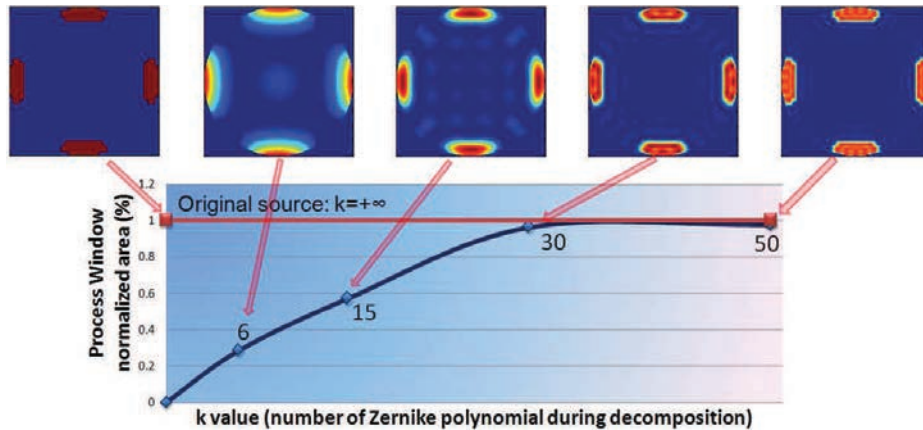


Figure 2: Normalized Process window area vs k value

As we can see, the decomposition into Zernike polynomial doesn't induce

great impact on the process window, as long as we use enough polynomials, for both parametric and freeform source. We use $k = 30$ for the rest of the study as this represent the tight trade-off between accuracy and speed.

2 Measure source difference

Now that we had shown that the Zernike decomposition of a source is possible, we would like to use such decomposition for comparing sources. In fact, once a source is decomposed into a sequel of Zernike polynomial, it is defined into the Zernike polynomial space, and the $C_{n,m}$ coefficients represents it's coordinates in this space. Therefore, if two different sources are defined in that same space with two different coordinates, we can easily measure the distance between this two points, by calculating the Euclidean distance between, with the equation:

$$diff = \sqrt{\sum_{n,m} (C_{n,m,1} - C_{n,m,2})^2} \quad (6)$$

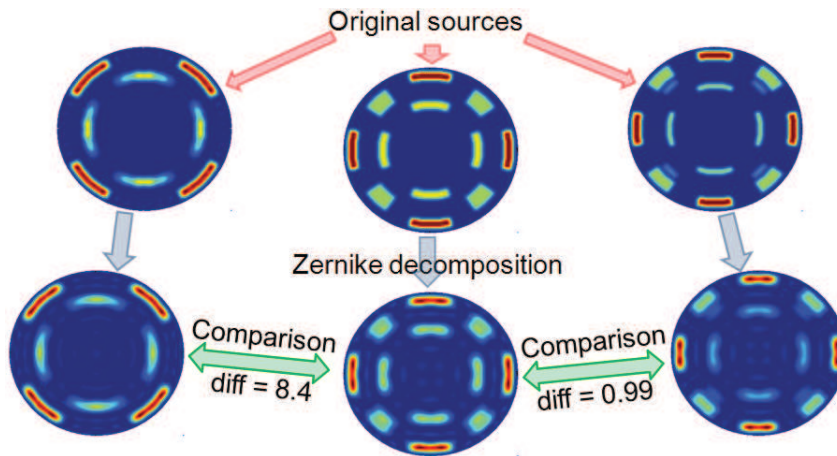


Figure 3: Illustration of the difference function, representing the source difference

We can see on graph 3 that such a distance between sources represent quite well the difference between sources, as it seems obvious for the human eye that the right and center source on 3 are more similar than the left and center ones. The Zernike decomposition distance show clearly that "similarity", as the distance is ten time smaller with the right source compare to the left source.

Such decomposition and distance measurement method can be used in several different cases. In fact, we can use the method to measure the impact of each parameter on the SMO flow. By modifying each parameter, we can compare the resulting sources, and see if the parameter has a great impact on the source. We can therefore easily spot the critical and non-critical parameters for optimization.

3 Application: measured source

Another direct application is to compare a measured source through the top hat source, or to another measured source. In fact, it had been shown that the measured source is slightly different than the source generated by the scanner and the one used in the optical simulation model [4]. We can easily measure that such modification had a small impact on the process window. In fact, for a simple CD versus pitch pattern we used, the process window area variation is about 2

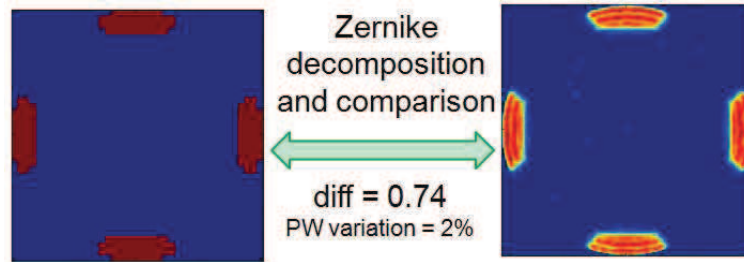


Figure 4: Zernike decomposition and comparison for the top hat c-quad and the measured c-quad

Such process window is easily predictable with wafer simulation; however, we wanted to know if this can be predicted with only the source study. Therefore we tried to link the process variation to the Zernike decomposition and comparison method for two similar sources.

As the goal was to link the Zernike decomposition and comparison value, we voluntarily degrade the source in several ways in order to compare the Zernike difference and the process window variation in different cases. The source used was a top hat c-quad measured on the scanner unit. The degradations shown in the graph 5 are deliberately exaggerated for illustration purposes. However, for this study, we used the following deformation:

- Scaling up or down the sigma
- Increase or decrease the angle of the c-quad
- Convolute the source with a Gaussian

For each type of modification, we used different amounts of degradation, allowing us to draw a curve for each of them. We measured the Zernike difference for each source, and simulated the corresponding process window on a simple pattern CD versus pitch.

As we can see in the graph for each kind of degradation of the source, the relative process window area seems inversely linked to the Zernike difference. We can therefore try to predict the process window variation due to a source variation by looking at the corresponding Zernike distance value. In fact, for the measured source, which has a Zernike difference value of 0.74, we could predict

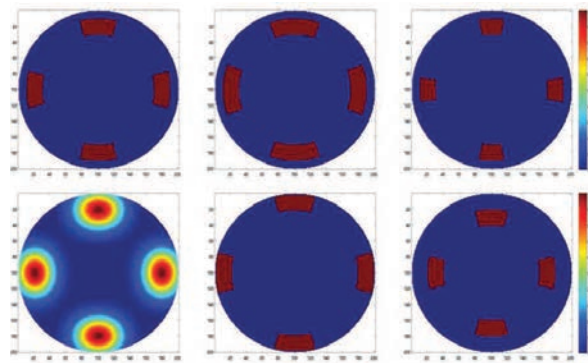


Figure 5: Illustration of the modifies sources. The degradation are exegete here, in order to be visible.

- (a) original source (b) increase angle (c) decrease angle
(d) gaussian convolution (e) increase sigma (f) decrease sigma

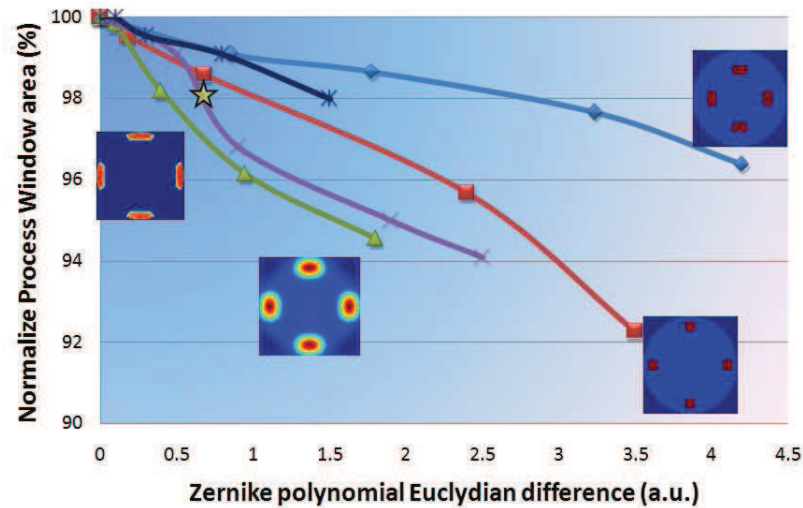


Figure 6: Process window variation vs Zernike difference value.

that the process window variation should be between 1% and 3%, by extrapolating the process window variation for the same Zernike difference value of the differentes source degradation we had studied. It appears after simulation that the process window variation is about 2%, which fits perfectly the predictions.

We can therefore say that we are able to predict the process window variation with this technique.

Finally, while using this method on measured sources, it could be interesting to decompose the difference in order to look at only single Zernike polynomial, or sequel of polynomial. For instance, it is well known that the first Zernike

polynomials orders represent usual optical aberrations. It also appears that the odd Zernike order represents a rotation of the source. The measure of such aberration could be helpful while trying to do scanner matching, or while measuring the source variation through time.

Conclusion

In this study, we have successfully introduced a new method to characterize and compare sources, by decomposing them into a Zernike polynomial sequel and measuring the Euclidean distance between them.

Also, we had shown that for small source modification, the Zernike difference could be related to the process window variation. This allows us to predict a process window variation for a measure source by measuring the Zernike difference from the theoretical source.

Finally, we know that some Zernike polynomials could be linked to optical and geometrical aberration, and work is currently ongoing to link each Zernike polynomial to different types of source variations.

- [1]. Alan E. Rosenbluth, et al. "Optimum mask and source patterns to print a given shape", SPIE Vol. 4346, pp 486-502 (2001)
- [2]. Alan E. Rosenbluth et al. "Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography", SPIE Vol. 7274, (2009)
- [3]. M. Mulder et al. "Performance of FlexRay, a fully programmable Illumination system for generation of Freeform Sources on high NA immersion systems", Proc of SPIE vol. 7640 (2010)
- [4]. C. Alleaume et al. "A systematic study of source error influence on imaging", Proc of SPIE (2010)
- [5]. Jin-hyuck Jeon et al, "Analysis of the impact of pupil shape variation by pupil fit modeling", Proc of SPIE vol. 7640 (2010)
- [6]. Bhatia, A. B.; Wolf, E. (1952). "The Zernike circle polynomials occurring in diffraction theory". Proc. Phys. Soc. B 65: 909

Enabling 22-nm Logic Node with Advanced RET Solutions

V. Farys^{a*}, L. Depre^b, J. Finders^c, V. Arnoux^b, Y. Trouiller^a, H.Y. Liu^b, E. Yesilada^a,
N. Zeggaoui^a, C. Alleaume^a

^a STMicroelectronics, 850 rue Jean Monnet, F 38926 Crolles Cedex, France

^b Brion Technologies, an ASML company, 4211 Burton Dr. Santa Clara, CA 95054, USA

^c ASML Netherlands B.V., De Run 6501, 5504DR Veldhoven The Netherlands

ABSTRACT

The 22-nm technology node presents a real breakthrough compared to previous nodes in the way that state of the art scanner will be limited to a numerical aperture of 1.35. Thus we cannot “simply” apply a shrink factor from the previous node, and tradeoffs have to be found between Design Rules, Process integration and RET solutions in order to maintain the 50% density gain imposed by the Moore’s law. One of the most challenging parts to enable the node is the ability to pattern Back-End Holes and Metal layers with sufficient process window. It is clearly established that early process for these layers will be performed by double patterning technique coupled with advanced OPC solutions.

In this paper we propose a cross comparison between possible double patterning solutions: Pitch Splitting (PS) and Sidewall Image Transfer (SIT) and their implication on design rules and CD Uniformity. Advanced OPC solutions such as Model Based SRAF and Source Mask Optimization will also be investigated in order to ensure good process control.

This work is a part of the Solid’s JDP between ST, ASML and Brion in the framework of Nano2012 sponsored by the French government.

Keywords: Logic 22nm, Pitch Splitting, SIT, SMO, Model Based SRAF

1. INTRODUCTION

Back End Of Lines (BEOL) layers become the most critical layers for 32nm logic node and beyond. The introduction of regular design rules on Gate layers induce an increase of design complexity on contact and metal trenches patterning. In order to maintain the “natural density shrink” of the Moore’s law, the ITRS roadmap indicates the necessity to print trenches period of 90nm for the 32nm logic technology nodes and 64nm pitches for the 22nm technology nodes¹. It is a great challenge because EUV technology is still not fully ready for industry purpose, and will be used in a second phase. It is clearly established now that in a first phase the technology nodes, from 32nm to 22nm, will be manufactured without any improvement of the optical performance of the scanner. Thus, state of the art scanner will be limited to a numerical aperture of 1.35 and immersion at a wavelength of 193nm. Simply considering the Rayleigh criterion, which shows a theoretical resolution limit of 71nm (80nm in practice), it appears that 22nm logic nodes require to print sub resolved features. Double patterning scheme is mandatory to overcome this challenge. Double Dipole Lithography (DDL) can be dropped out because although it has proven good process window margin for Metal patterning, this method is applicable only on feature above the resolution limit². Dark field mask and positive tone development resist are limiting factors for double patterning in a way that it is limited to print small trenches in a semi-dense configuration³. Such process is not capable to print below 60nm trenches and it is necessary to add chemical shrink⁴ which is pain full for process cost. The only viable solutions for patterning sub-resolved trench layers are pitch splitting with tone inversion or self-aligned double patterning process. We propose in this paper to compare two decomposition types: Litho – Etch – Litho – Etch (LELE) process scheme with negative tone developer (NTD), and Sidewall Image Transfer (SIT) with spacer on resist process as described in Figure 1 in the case of MetalX (Mx) jog structure.

The first decomposition is a direct one, in the sense where you “only” have to split the pitch and what you see on both lithographic steps is what you get on wafer after the full process (Figure 1.a). The two others are indirect

decompositions with the first lithographic step that permits to define structure supporting spacer deposition and second lithography extra features removal. One particularity of the SIT process is the possibility to pattern the 1st lithographic step on both ways as described in Figure1.b and Figure1.c and resulting in the same output. It is due to the fact that lines at half pitch are derived from the 1st lithographic lines at pitch after spacer deposition process. In that sense pitch's lines and half pitch lines can be reversed.

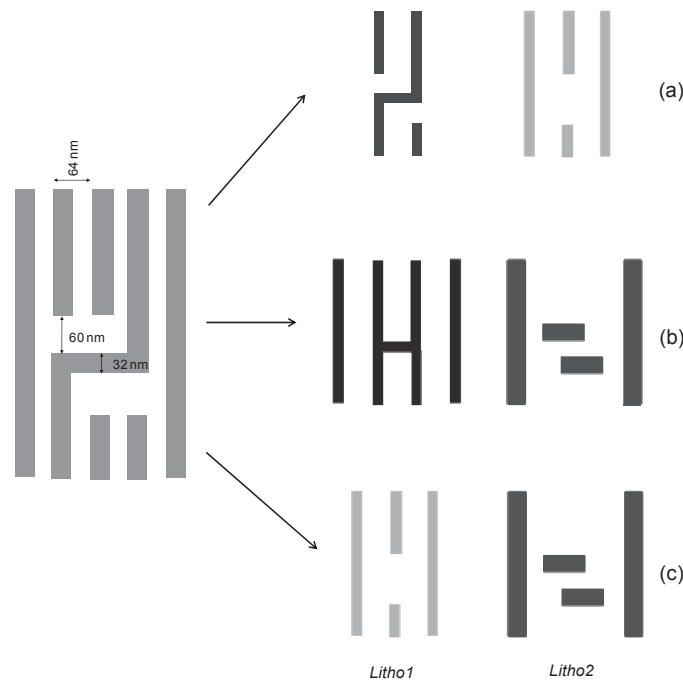


Figure 1 – Splitting comparison for Metal jog structure with 1st litho on the left and 2nd litho on the right; **a)** double patterning with LELE scheme, **b)** Sidewall Image Transfer 1st decomposition (SIT1), **c)** Sidewall Image Transfer 2nd decomposition (SIT2)

We propose to compare these two decomposition style (1 LELE and 2 SIT) on 64nm pitch Mx jog structure with 32nm line and 60nm of gap.

2. DOUBLE PATTERNING PROCESS FLOW

The number of steps increase in a double patterning flow regarding standard single patterning process. We can count 2 steps with one lithographic and one etch step in a single patterning flow. On the Figure 2 we have reported the process flow in the case of pitch splitting method with Litho-Etch-Litho-Etch process flow.

For this LELE we have five steps with two consecutive litho-etch steps and one alignment step between the first and second exposure. On this figure we have reported the case of the Mx jog. The first lithographic step (*Litho1*) consists in printing trenches within resist deposit on a hard mask. The first etch step (*Etch1*) permits to transfer the trench into the hard mask. Then this operation is repeated after alignment of the second mask and resist's film deposition, with trench patterning (*Litho2*) and transfer into hard mask (*Etch2*).

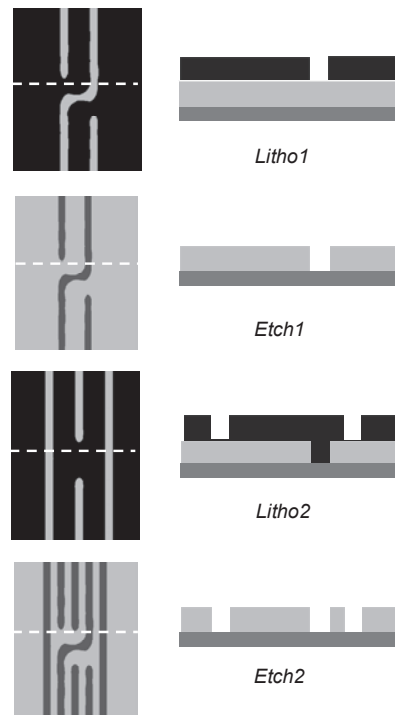


Figure 2 – Process flow for a double patterning scheme based on Litho-Etch-Litho-Etch (LELE) process

For the SIT we can list six consecutive steps. On the Figure 3 we have reported the four principal steps of the process flow for both decomposition (SIT1 and SIT2). The first lithographic step consists in patterning line of resist on top of a hard mask (*Litho1*). A spacer deposition is performed during the second step (*Spacer*) with a etch back and stripping process to remove supporting line of resist. Thus it remains spacer features at half pitch regarding line of resist of the 1st lithographic step. The spacer profile depends on the 1st lithographic step as highlighted between Figure 3.a and Figure 3.b. The second mask is then aligned and exposed in order to create plug of resist in the extra features area (*Litho2*). By this way we can define the metal line-end as well as removing dummies supporting line used for spacer growth. Then the final etch transfer the pattern within the hard mask defining the Mx jog structure requested (*Etch*).

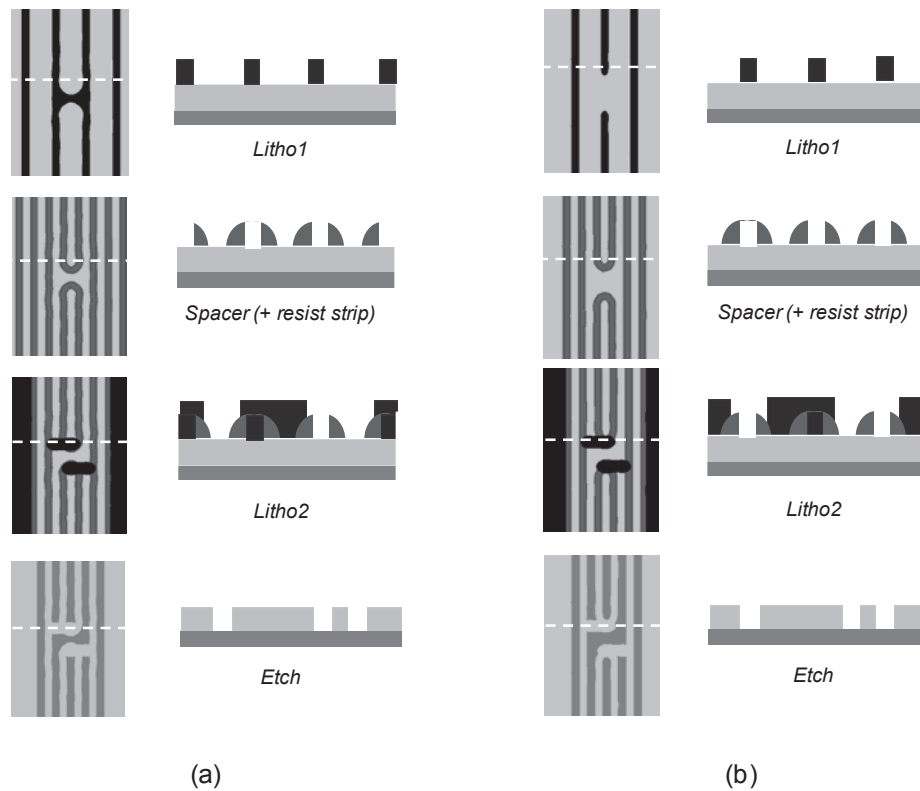


Figure 3 – Process flow for a double patterning scheme based on SIT process flow (Litho-Spacer-Litho-Etch); **a)** 1st SIT decomposition type (SIT1), **b)** 2nd SIT decomposition type (SIT2). Between these 2 decomposition only the Litho1 step is different

By looking at the final outputs between LELE, SIT1 and SIT2 we can see some obvious differences on the contour shapes. Actually LELE structures present rounded line-end whereas SIT has straight line-end definition due to the fact that it is cut by the second exposure. Moreover we can see some risk of pinching on horizontal line of the 2D shape for LELE and SIT1 whereas this risk is minimized on SIT2.

These contour differences highlight the fact that CD variability will be dependent on the double patterning scheme that will be used. Thus we propose to compare the CD uniformity for each of these decompositions.

3. CD UNIFORMITY CALCULATION

We propose to use an edge-based method to determine the CD uniformity apply on 2D jog structures. The principle is to take into account independently the CDU contribution from each edge considering the 3σ variability from lithography budget and process step (etch, overlay, etc...). The CDU calculation for a gap between line-ends of two consecutive lithographic steps is describe on the Figure 4.

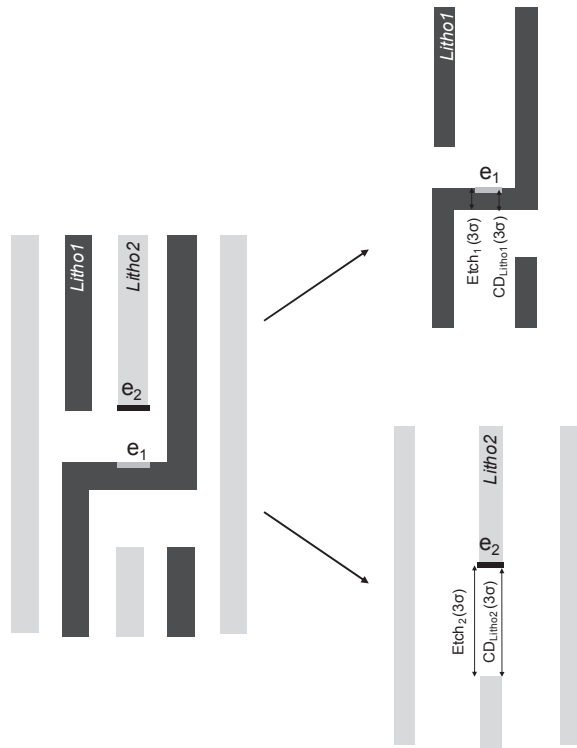


Figure 4 – Edge-based CD uniformity calculation method. CD variability (3σ) from each edge are independently taken into account and then recombined to determine the final CDU (3σ) between edges e_1 and e_2

On this figure, we consider that the CDU (3σ) of the gap between edges e_1 and e_2 (gap e_1-e_2) is impacted by the variability of edge e_1 from the *Litho1* step, including respectively half of CD_{Litho1} (3σ) and $Etch_1$ (3σ) from lithographic and etch dispersion, and the variability of edge e_2 from *Litho2* step (driven by half of CD_{Litho1} (3σ) and $Etch_1$ (3σ)). On top of that we have also to consider the variability coming from the overlay between *Litho1* and *Litho2*. Considering all these variability we can derive a global CD uniformity (3σ) between edges of two different exposure steps as mention in Equation (1).

$$Gap_{e_1-e_2}(3\sigma) = \sqrt{\left(\frac{CD_{Litho1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{Etch_1}{2}\right)^2 + OVL^2 + \left(\frac{CD_{Litho2}}{2}\right)^2 + \left(\frac{Etch_2}{2}\right)^2} \quad (1)$$

Then we can apply this global CDU calculation to the three different kinds of splitting strategy: LELE, SIT1 and SIT2. We propose to look deeper on the variability of the gaps between line-ends and 2D shape (*Gap1* and *Gap2*) as well as horizontal line of the 2D shape (*Line*). On the Figure 5 we have reported these three decomposition style with the corresponding lithographic steps and the CD variability needed for the calculation.

For the LELE process scheme (Figure 5.a) we can calculate the CDU for *Gap1*, *Gap2* and *Line* as a function of the CD_1 and CD_2 of first lithographic step and CD_3 of second one. The equation (2) permits to determine the 3σ CD variability for the *Gap1* where we can see that it is exclusively driven by the first patterning step. This variability is similar to a single patterning approach. The equation (3) represents the variability for the *Gap2* which is different from *Gap1* in a sense where it is impacted by the double patterning steps. That's for why lithographic variation from each steps (CD_2 and CD_3) as well as etch of first and second patterning ($Etch_1$ and $Etch_2$) and overlay error (OVL) are taking into account. The *Line* variability is simply driven by the first patterning step with lithography (CD_2) and etching ($Etch_1$) contributions as detailed in Equation (4).

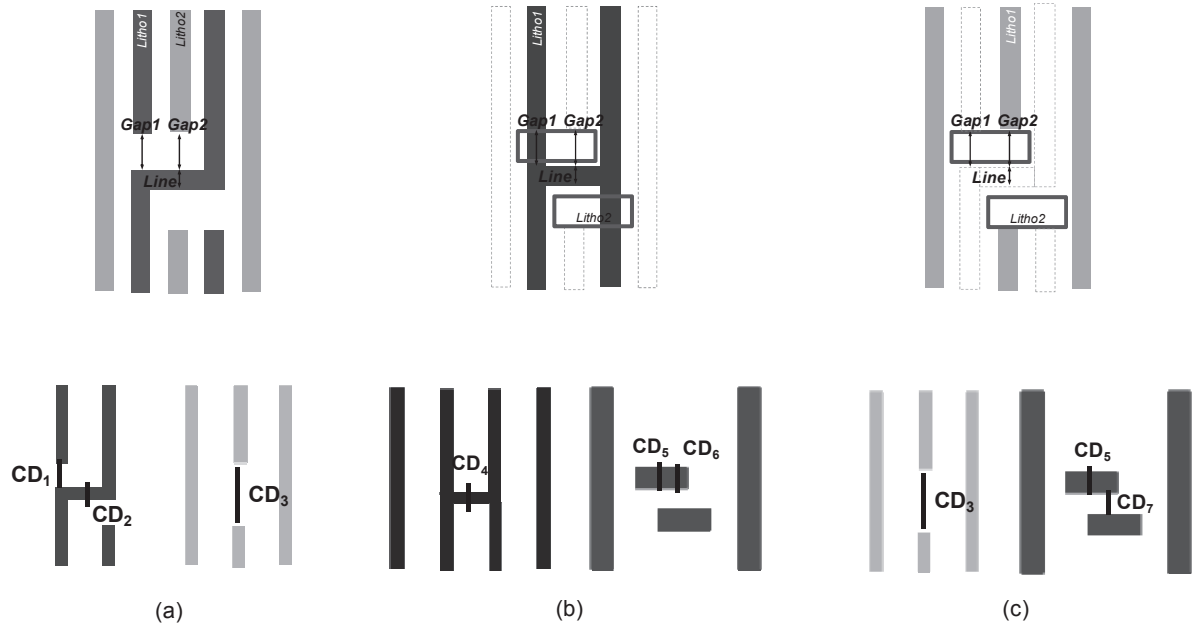


Figure 5 – CD variability definition of both patterning steps for every decomposition style, **a)** LELE scheme, **b)** SIT 1st decomposition (SIT1) and **c)** SIT 2nd decomposition (SIT2)

$$Gap1(3\sigma) = \sqrt{CD_1^2 + Etch_1^2} \quad (2)$$

$$Gap2(3\sigma) = \sqrt{\left(\frac{CD_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{CD_3}{2}\right)^2 + OVL^2 + \left(\frac{Etch_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{Etch_2}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$Line(3\sigma) = \sqrt{CD_2^2 + Etch_1^2} \quad (4)$$

On the Figure 5.b we have reported the first decomposition style for Sidewall Image transfer (SIT1). In that process the spacer deposition does not impact the overall variability of *Gap1*, *Gap2* and *Line*. Indeed, the *Gap1* variability is exclusively driven by the second exposure step of the block mask with the CD_5 contribution from lithography and the final Etch (*Etch*) as described in the Equation (5). The Equation (6) describes the variability for *Gap2* where lithography contributions from first step (CD_4) and second step (CD_6) are taken into account as well as overlay (*OVL*) and etching steps (*Etch*). As it is the case for LELE scheme, we can also notice a double CDU distribution between *Gap1* and *Gap2* due to the fact that the first distance is impacted by single exposure step whereas second one is impacted by double patterning process. Finally the *Line* variability is only driven by lithographic (CD_4) and etching (*Etch*) components.

$$Gap1(3\sigma) = \sqrt{CD_5^2 + Etch^2} \quad (5)$$

$$Gap2(3\sigma) = \sqrt{\left(\frac{CD_4}{2}\right)^2 + OVL^2 + \left(\frac{CD_6}{2}\right)^2 + Etch^2} \quad (6)$$

$$Line(3\sigma) = \sqrt{CD_4^2 + Etch^2} \quad (7)$$

The last decomposition (Figure 5.c) represents the Sidewall Image Transfer of the second decomposition style (SIT2) where only the first lithographic step is different regarding SIT1. In that case, although there is a slight change on the first lithographic step we can see that spacer deposition as to be taken into account in the definition of the 2D shape structure as well as the gap with the line end (*Gap2*). This a major concern because we see here that the decomposition style is impacting the overall CDU. Equation (8) describes the CD variability of *Gap1* which is exactly the same as equation (5) where dispersion is driven by first patterning step. For *Gap2* we have to take into account overlay error (*OVL*) and spacer deposition due to the fact that edge of the 2D shape is derived from the spacer growth (*Spacer*) of the first patterning step (CD_3) as well as the definition of the second exposure (CD_7) and a final etching step (*Etch*). Equation (9) allows to calculate the CDU (3σ) of *Gap2*. As mentioned, the horizontal line of the 2D shape (*Line*) is derived from the spacer growth (*Spacer*) but it is also driven by the whole gap variation of first lithographic step (CD_3) as well as gap of second exposure (CD_7). We have to consider the overlay error (*OVL*) and the etching step (*Etch*) to get the final CDU picture of this line as mentioned in equation (10).

$$Gap1(3\sigma) = \sqrt{CD_5^2 + Etch^2} \quad (8)$$

$$Gap2(3\sigma) = \sqrt{\left(\frac{CD_3}{2}\right)^2 + Spacer^2 + \left(\frac{CD_7}{2}\right)^2 + OVL^2 + Etch^2} \quad (9)$$

$$Line(3\sigma) = \sqrt{CD_3^2 + (2.Spacer)^2 + CD_7^2 + OVL^2 + Etch^2} \quad (10)$$

These equations will allow us to determine the 3σ CD uniformity of the critical dimension of an Mx jog structure at 64nm pitch. For the calculation we propose to use process data assumption for overlay, etching and spacer deposition steps. Concerning lithographic contributions we do not have measured data so we propose to emulate them based on simulation of the total lithographic budget. We have reported in the table 1 the process assumptions we made for the CDU calculation.

	<i>Etch</i>	<i>Spacer</i>	<i>Overlay</i>	<i>Focus</i>	<i>Dose</i>	<i>Mask</i>
Dispersion (3σ)	1nm	1.5nm	3nm	25nm	1%	0.5nm

Table 1 – Dispersion values (3σ) used for the CDU calculation of LELE and SIT double patterning scheme

We propose to make a comparison between single exposure process at 90nm pitch with a CD target of 45nm and double patterning process with a pitch of 64nm and a CD target of 32nm. For the simulation we consider an Annular source with partial coherence [0.6/0.8] at 1.35NA and XY polarization for the single patterning process. Concerning the double patterning process, we consider a Quasar source with XY polarization and 30° of pole opening angle for a partial coherence [0.85/0.97] at 1.35NA. The simulations have been performed using Panoramic technology. For the rest of the paper we propose to represent the CDU (3σ) in percentage of the CD target in order to make some cross comparison between single and double patterning scheme.

On Figure 6 we have reported the CDU (3σ) in percentage of CD target, of the Mx jog structure for *Gap1*, *Gap2* and *Line* in the case of single exposure step, LELE, SIT1 and SIT2. In these results we can see that the single

exposure technique has the same variability whatever the dimension is, and it is 9% of CD variability. The *Gap1* dimension for LELE is performed during the first patterning step, this is thus resulting in a similar CDU of 9% regarding single exposure step. In the case of SIT1 and SIT2 we can highlight the fact that the variability is less than single exposure step (5% versus 9%). This is due to the fact that in SIT process the variability of *Gap1* is exclusively driven by the second exposure step which is a line of resist to define this dimension. We have a better CD control on a resist line rather than on the gap between two trench-ends, that's for why we obtained a lower variability with the SIT process than LELE or either single exposure.

In the case of *Gap2* and *Line* we see an important degradation of the CDU for LELE and SIT process regarding single exposure step with 1.5x to 2.5x CDU degradation. These degradations are coming from the added process steps involved in the double patterning scheme. In the case of the largest CDU values, 24% for *Line* in LELE and 19% for *Line* in SIT1, it is exclusively due to lithographic process. Effectively, in that case the main contributor to CDU is the CD variation of the first exposure step with 23% for LELE (distance CD_2) and 18% (distance CD_4) for SIT1.

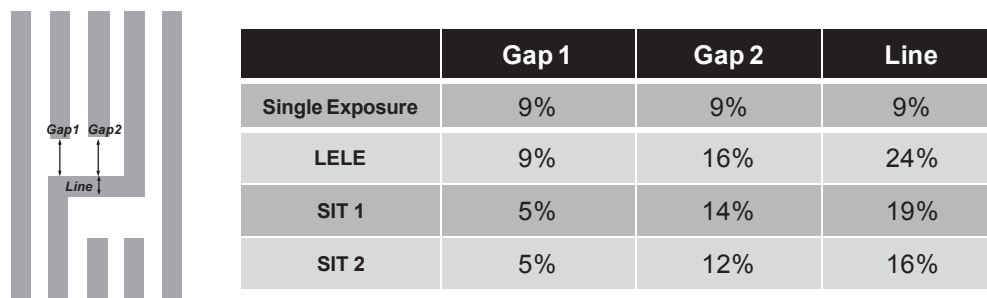


Figure 6 – CD uniformity (3σ) calculation results for Mx 2D shape structure in the case of single exposure, LELE, SIT1 and SIT2 process flow

These structures are “super critical” in the sense that it is necessary to print small line of 32nm width in a semi-dense configuration (pitch 128nm). In the case of SIT2, the lithographic contribution is smaller compared to the others splitting techniques with a variability of the dimension CD_3 of 8% (overall CDU for *Line* SIT2 is 16%). The main lithographic contributor for SIT2 comes from the first exposure step which present a less critical structure than the other technique with the necessity of printing a gap of 152nm (CD_3), a CD width of 32nm with 128nm pitch.

In the case of the “super critical” configurations, there is no room to insert supporting SRAF and the lithographic process is mainly controlled by the source performance. Printing small lines of 32nm in a semi-dense configuration (line/space ratio of 1:3) leads to a process window that is not at the isofocal regarding single exposure step with 1:1 line/space ratio.

If we look at the features after decomposition on Figure 1, it appears that there are four different structures depending on the decomposition style we used. Three structures are quite regular (*Litho1* and *Litho2* of LELE and *Litho1* of SIT process) and one structure looking such as random dots (*Litho2* of SIT process). We propose then to use RET solution to enhance the overall lithographic process window of each of these structures. Source optimization (SO) is well suitable in case of regular pattern due to the fact that the SO process is optimum for periodic structures. In the case of random dots we plan to use model-based SRAF (MB-SRAF) in order to improve the placement of the scattering bars and gain some process window.

4. RET IMPROVEMENT

Brion's Tachyon Source-Mask Optimizer (SMO) is used to co-optimize the scanner source and the mask design simultaneously⁵. Since its beginning it has been integrated with ASML scanners and Brion computational lithography solutions to enhance lithographical performance even further. The optimization flow, which is a true co-optimization of the source and mask based on Edge Placement Error, can be customized by the user depending on the specific applications. In our case, Tachyon SMO has been used to optimize the freeform source

for various sets of structures in both vertical and horizontal orientations. Each set of SMO has been optimized using four cells. The first two are anchor features in horizontal and vertical direction at CD of 32nm and pitch of 128 nm. The last two cells are the “super critical” structures of the splitting techniques in both directions. The SMO flow requires several input parameters for the optimization: input model, cell windows, DOE type and process information. We selected a full resist model as input for Tachyon SMO. This model has been previously calibrated using standard methods for model calibration. Source-only (SO) optimization has been selected and by fixing the mask and adjusting the source to achieve an optimized result. The flow can output various source types. The freeform source which is a pixilated source has been chosen as a source type for the optimization. The optimization based on Edge Placement Error (EPE) minimization is performed through seven evaluation conditions at the +/- 40 nm defocus, +/- 3% delta dose and +/- 0.5 nm mask error offsets.

Figure 7 illustrates the output of the optimized source for the three different structures coming from LELE and first lithographic step of SIT process. We can see that the SO process has made some slight modification of the source shape regarding the initial Quasar shape that has been used for first lithographic simulation. We can see that the optimization process acts essentially for *Litho1* structures of LELE process (Figure 7.a) and *Litho1* of SIT1 process (Figure 7.c). Concerning the *Litho2* of LELE and *Litho1* of SIT2 (Figure 7.b) the SO process changes are minor and the output source is close to the initial Quasar shape.

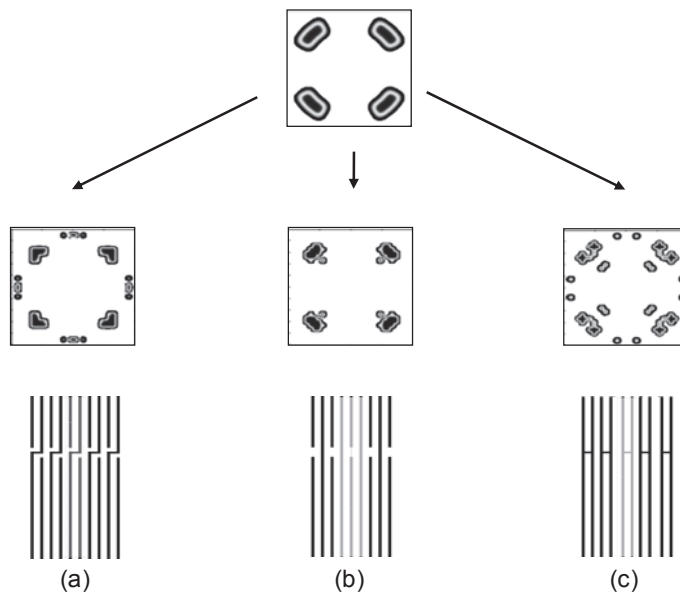


Figure 7 – Source shape outputs after SO process for **a)** *Litho1* of LELE process, **b)** *Litho2* of LELE and *Litho1* of SIT2 process, **c)** *Litho1* of SIT1 process

On Figure 8 we have reported the Bossung curves for the *Litho1* structures of the SIT1 process. It represents the CD variations through dose and focus of the CD4 distance with a targeted value of 32 nm at nominal condition. The Bossung with the Quasar illumination is represented on the Figure 8.a and with the SO source on the Figure 8.b. We can see here that the CD variations through the process window have a curvature more important with the Quasar illumination than the optimized SO source. It indicates that the source optimization process allows to move the process toward the isofocal (curvature equal to zero).

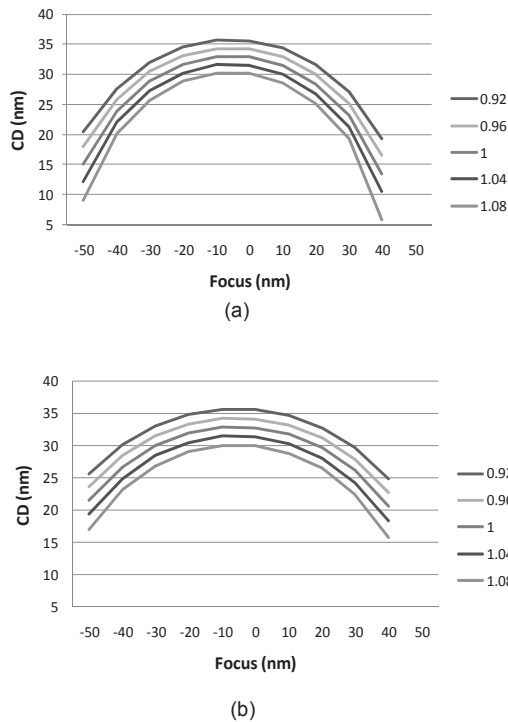


Figure 8 – CD variations through dose and focus (Bossung curves) of the distance CD_3 of the Litho1 of SIT1 process, **a)** for Quasar 30° [0.85 0.97] XY polarization and **b)** for SO source

In the case of *Litho2* for the SIT process presenting random dots we have applied a model-based SRAF solution provided by Brion technology. The principle consists in simulating the intensity map and use it as a guidance map for scattering bars placement. The SRAF candidates are then inserted at places where it enhances the contrast of the main pattern. Then a final cleaning step is applied to reach DRC specifications. On the Figure 9 we have reported the scattering placement with a rule-based method (Figure 9.a) and after model-based method (Figure 9.b). We can see some modification of the SRAF width and position with the model-based versus the rule-based one.

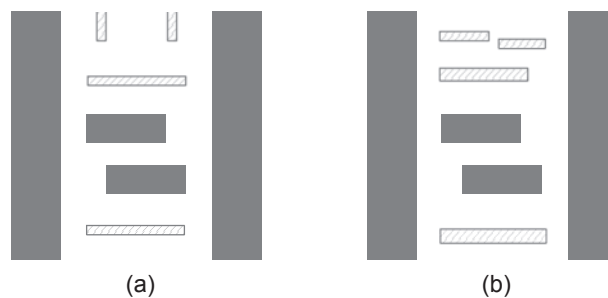


Figure 9 – SRAF placement for Litho2 of SIT process, **a)** Rule based placement, **b)** Model-based placement

In the table 2 we have reported the CD variation (3σ) before and after RET optimization of each dimension from CD_1 to CD_7 . Note that CD_1 to CD_4 dimension have been optimized using SO process and CD_5 to CD_7 have been enhanced using MB-SRAF solutions. The most important improvement concerns the “super critical” structures CD_1 , CD_2 and CD_4 where the CD variability have been improved from 1.5x to 2x.

	CD ₁	CD ₂	CD ₃	CD ₄	CD ₅ - CD ₇
CDU reference (3σ)	8%	23%	18%	7%	4%
CDU improvement (3σ)	7%	14%	12%	5%	3%

Table 2 – CDU (3 σ) for lithographic step before and after RET optimization

We introduce these simulated data improved by the RET optimizations within the overall CDU calculation of the *Gap1*, *Gap2* and *Line* distance of the Mx jog structure. The results are reported on the Figure 10 where we can see a great improvement of the CDU in the case of LELE process and SIT1 process with a 1.5x to 2x CDU enhancement regarding reference process. Concerning the SIT2, RET improvement is quite low with only 1% gain on the overall CDU. It is essentially due to the fact that the CDU of this decomposition style is not driven by lithographic step but have added contributions regarding other splitting techniques such spacer deposition (see equations 8 – 10).

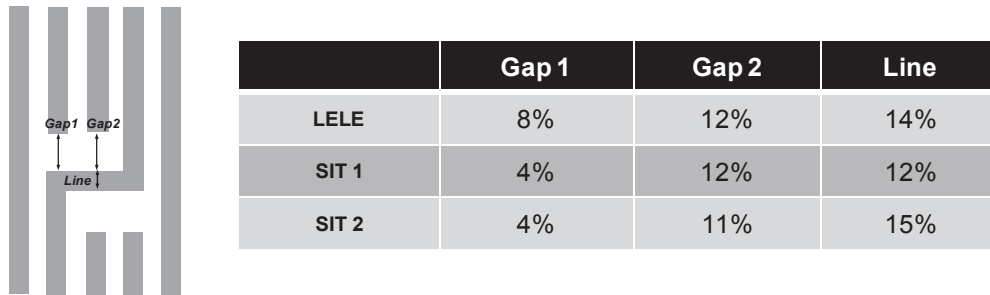


Figure 10 – CD uniformity (3 σ) calculation results for Mx 2D shape structure in the case of LELE, SIT1 and SIT2 process flow

After RET optimization we see that the SIT1 process offers the best CDU control regarding SIT2 and LELE process. Gap1 distance has a CDU below single patterning step (4% versus 9%) and Gap2 and Line distance have CDU of 12%. In addition to the “computational” tricks, we can also consider hardware optimization to improve the overall CD uniformity such as dose control⁶.

5. CONCLUSION

We have presented in this paper a comparison of double patterning techniques for metal-X layers with sub resolution pitch of 64nm. We have made a CDU analysis on 2D shapes jog structures in the case of Litho-Etch-Litho-Etch scheme and Sidewall Image Transfer process. We highlighted the fact that double patterning scheme presents 2 ~ 3x CDU degradation regarding single patterning process. This is due to the increase of process steps where we have to consider multiple lithographic, etching, spacer deposition and overlay contributions. Moreover it appears that in a double patterning scheme we have to print feature in semi dense configuration that leads to lithographic process capability which is not at the isofocal. This limitation in terms of lithographic performance is one of the key constraints on the overall CD uniformity. We have shown that advanced RET solutions such as source optimization and model based SRAF placement allows to overcome this problem by enhancing the lithographic performance and move the CD variation through dose and focus towards the isofocal. We have also shown that the decomposition style is a key factor on the CD process control. Thus this decomposition style has to be taken into account during splitting rules definition. In that sense it is preferable to have the 2D shape (polygon with more than 4 vertices) on the first lithographic step in the case of SIT process. By this way, the spacer deposition is not taken into account in the overall CDU leading to a better control of the process. The sidewall image transfer technique offers the best option in term of CDU control with lower variability on line-

end definition than single exposure step and better CDU control on 2D shapes distance compared to LELE process.

ACKNOWLEDGMENT

The authors will thank all the partners of the Solid Nano2012 program and Nicolas Martin field application engineer at Brion technology for his help on MB-SRAF solution.

REFERENCES

1. ITRS roadmap, <http://www.itrs.net/Links/2010ITRS/Home2010.htm>
2. A-Y. Je *et al.*, "Model-based double dipole lithography for sub-30nm node device", Proc. SPIE 7823 (2010)
3. J.C. Urbani *et al.*, "Characterization of inverse SRAF for active layer trenches on 45-nm node", Proc. SPIE 6607 (2007)
4. Y. Chen *et al.*, "Sub-20 nm trench patterning with a hybrid chemical shrink and SAFIER process", Proc. SPIE 7273 (2009)
5. S. Hsu, "An innovative Source-Mask co-Optimization (SMO) method for extending low k1 imaging", Proc SPIE vol. 7140 (2008)
6. J. Finders *et al.*, "Dense lines created by spacer DPT scheme: process control by local dose adjustment using advanced scanner control", Proc. SPIE 7274 (2009)

Best Focus Shift Mitigation for Extending the Depth of Focus

A.Szucs^a, J.Planhot^a, V.Farys^a, E.Yesilada^a, C.Alleau^a, L.Depre^b, R.Dover^b, C.Gourgon^c,
M.Besacier^c, A. Nachtwein^d, P. Rusu^d

^a STMicroelectronics, 850 rue Jean Monnet, F 38926 Crolles Cedex, France

^b ASML Brion, 4211 Burton Dr. Santa Clara, CA 95054, USA

^c LTM, CNRS CEA, 1 avenue des Martyrs, F 38054 Grenoble, France

^d ASML Netherlands B.V., De Run 6501, 5504DR Veldhoven The Netherlands

ABSTRACT

The low- k_1 domain of immersion lithography tends to result in much smaller depths of focus (DoF) compared to prior technology nodes. For 28 nm technology and beyond it is a challenge since (metal) layers have to deal with a wide range of structures. Beside the high variety of features, the reticle induced (mask 3D) effects became non-negligible. These mask 3D effects lead to best focus shift. In order to enhance the overlapping DoF, so called usable DoF (uDoF), alignment of each individual features best focus is required. So means the mitigation of the best focus shift.

This study investigates the impact of mask 3D effects and the ability to correct the wavefront in order to extend the uDoF. The generation of the wavefront correction map is possible by using computational lithographic such Tachyon simulations software (from Brion). And inside the scanner the wavefront optimization is feasible by applying a projection lens modulator, FlexWaveTM (by ASML). This study explores both the computational lithography and scanner wavefront correction capabilities.

In the first part of this work, simulations are conducted based on the determination and mitigation of best focus shift (coming from mask 3D effects) so as to improve the uDoF. In order to validate the feasibility of best focus shift decrease by wavefront tuning and mitigation results, the wavefront optimization provided correction maps are introduced into a rigorous simulator. Finally these results on best focus shift and uDoF are compared to wafers exposed using FlexWave then measured by scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: Best Focus Shift, Depth of Focus, Tachyon SMO-FW, FlexWaveTM, Scanning Electron Microscopy (SEM)

1. INTRODUCTION

In order to fulfill the increasing demand for 28 nm design rule devices, a number of new and existing lithography techniques have been developed and put on production. In this low k_1 domain, the DoF is limited compared to prior technology nodes. This limitation turns out to be more problematic when there is a wide range of different 1D and 2D structures, as is the case for metal layers. For these layers the uDoF is further constrained due to mask effects and the structure dependence of the best focus. So the mitigation of the best focus shift due to mask topology enables uDoF improvement.

RET (Resolution Enhancement Techniques) can be a solution to extend the uDoF. They allow a high fidelity mask-to-silicon transfer thus an extension of optical lithography in the low- k_1 domain. These techniques most usually include off-axis illumination, phase-shifting masks (PSM) and OPC (Optical proximity Correction). OPC is widely used to compensate for lithography process proximity effects – modification of the shapes at the mask level by applying models that have the capability of predicting printing at the wafer level.

Within the frame of RET optical simulations, the computational process time duration for mask simulation is a challenge. Therefore to reduce the process time, approximation methods are applied in a production flow for simulations near the mask. The most commonly used method is the thin-mask model, also called the Kirchhoff approximation, which considers the mask thickness to be negligible and infinitely thin. This approximation has the advantage of mathematical simplicity in terms of implementation into OPC simulations. However because it is a scalar method, it has limitations compared to rigorous methods which apply vectorial calculations [1].

The Kirchhoff approximation correctly works until the features size of the mask approaches the 193 nm optical wavelength of the exposure system. For printable feature sizes needed at the 2x nm node the mask thickness cannot be ignored anymore. The so called mask 3D (M3D) effect, which leads to best focus shift, contrast degradation, difference of the diffraction intensity comes in to play.

This paper focuses on diminution of best focus shift with the aim to find a way to improve the uDoF. The used approach includes RET/OPC solutions using computational lithographic and the FlexWave lens modulator within the scanner. This paper includes a short description of the theoretical M3D effects on best focus and FlexWave. This is then followed by experiment methods and results which are split into two main parts: simulation related work and validation by process:

In the first section, based on computational lithography/RET; an approach is investigated for best focus shift mitigation by correcting the wavefront in order to compensate for the mask 3D effects with Brion Tachyon software. This work consists of three steps: a) simulation of the focus shift b) mitigation by wavefront modification and c) feasibility by using rigorous lithographic simulation with Panoramic® software.

In the second section, based on exposed wafer analysis, simulation data is compared with scanning electron microscopy (SEM) measurements on proceeded wafers using FlexWave.

2. EFFECTS OF THREE-DIMENSIONAL MASK TOPOLOGY ON FOCUS

Light diffraction rigorous modeling of the mask was introduced by A. Wong by illustrating and explaining important mask 3D effects [2]. Since then numerous studies were accomplished; particularly with high NA lithography.

The basis of M3D is to recognize that masks have a non-negligible thickness or topography. This topography can be described by a set of parameters (optical index; thickness of the absorber etc.). These mask 3D effects are approached or determined by mask diffraction analysis as they are mainly caused by light diffractions [3][4], which occur at the edge of structures at mask level.

These topological effects are responsible for the difference in phase of the diffracted orders due to asymmetry between them [5]. This fact implies the delta best focus difference of the variety of structures. Further investigation of the delta phase assignment on line-versus-pitch structures has already showed that the phase difference of the diffracted orders have a corresponding phenomenon to the one induced by wavefront aberrations of the projection optics [3]. The mask 3D effects can thus be compensated for by wavefront optimization.

3. THE FLEXWAVE MANIPULATOR

A possible solution to handle some of the mask 3D effects can be the application of the FlexWave lens manipulator available in ASML scanners.

The latest generation NXT: 1950i systems have the FlexWave optical element manipulator (see Figure 1). This advanced actuator allows the adjustment of the wavefront to compensate for process induced effects, like M3D effects, which can be responsible for focus and pattern shifts. This module is composed of two optical elements placed near the projection lens pupil plane. They consist of individually heated segments translating into a change in optical path length as a function of the position. It allows the adjustment of higher order aberration terms and tuning the phase of the wavefront. This phase wavefront change in the projection pupil can thus mitigate M3D effects.

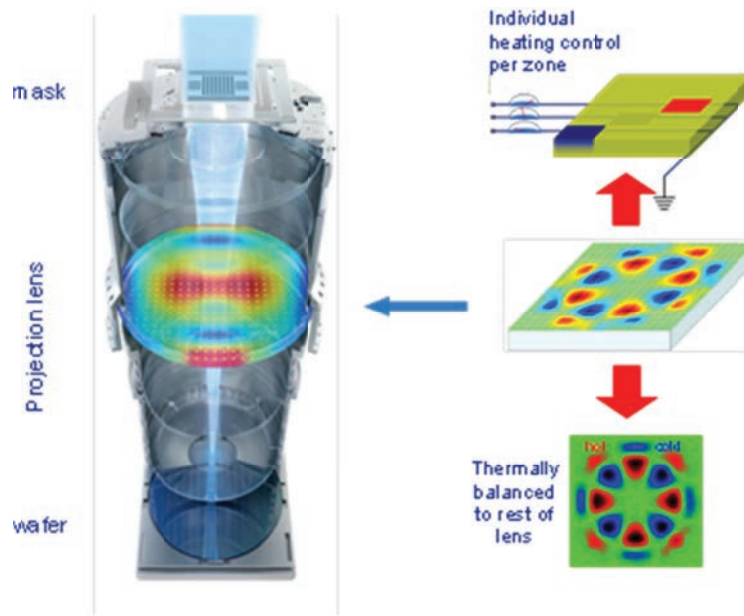


Figure 1: The principle of the FlexWave optical element manipulator available in ASML NXT: 1950i scanner; placed near the projection lens pupil plane; depicted here by a plane-parallel optical plate consisting individual heating segments

Besides reducing the M3D effect, the FlexWave module can also minimize the overlay error performance of the scanner and better control lens heating that can occur over time (these possibilities are not exploited within the frame of this study).

Reducing the best focus differences and thus improving the overlapping DoF has been already analyzed [6]. By applying a specific application wavefront, it can correct up to 50% of the best focus differences based on SEM measurement analysis.

Tachyon source mask optimization (SMO) based simulations are used to generate the pupil wavefront required as input for FlexWave. This SMO-FlexWave (SMO-FW) module is optimizing the wavefront for a set of structures defined by the user. Two ways are proposed to realize the optimization flow: one is source mask optimization with wavefront optimization; the other is only wavefront optimization with a fixed mask and fixed illumination. This second option can be suitable for wavefront tuning in a manufacturing environment [7]. This work is based on the only wavefront optimization with an already optimized mask and illumination source by OPC.

4. SIMULATION EXPERIMENTS AND RESULTS

As described earlier this section is dedicated to computational wavefront optimization for the feasibility of uDoF improvement by decreasing the best focus dispersion.

4.1 Experimental setup

These simulation experiments are carried out on a 28 nm Metal layer using an ASML NXT:1950i scanner (4X reduction immersion lithography exposure system with a wavelength $\lambda=193$ nm and numerical aperture $NA=1.35$). The Tachyon computational lithography platform (Tachyon SMO-FW software for RET) is used for optimization in this study. The simulation experiments are split into two parts regarding the illumination modes (both XY polarized): Annular ($\sigma_{\text{outer}} = 0.9$; $\sigma_{\text{inner}} = 0.7$) and C-Quad ($\sigma_{\text{outer}} = 0.8$; $\sigma_{\text{inner}} = 0.6$). The reason to split the experiments in to two parts, from the point of view illumination modes, is that the utilization of C-Quad illumination can result in more important effects.

Regarding the structures selection serving for wavefront correction map generation: Table 1 includes 1D and 2D features which will be called calibration features in the following part of the paper (these are the most focus sensitive features from a previous focus shift study).

Table 1: Information on selected 1D and 2D calibration structures for the simulations

	<i>Test structure</i>	<i>Structure Notation</i>		<i>Test structure</i>	<i>Structure Notation</i>
1D	Dense	1	2D	Line End	6
	3 Lines_Pitch A	2		2D_A	7
	3 Lines_Pitch B	3		2D_B	8
	2 Lines	4			
	4 Lines	5			

So the following four sets of wavefront optimizations are performed:

1. Illumination mode : C-Quad ($\sigma_{\text{outer}} = 0.8$; $\sigma_{\text{inner}} = 0.6$)
 - a. on 1D calibration features
 - b. on 2D calibration features
2. Illumination mode : Annular ($\sigma_{\text{outer}} = 0.9$; $\sigma_{\text{inner}} = 0.7$)
 - a. on 1D calibration features
 - b. on 2D calibration features

4.2 Results

As the starting point of the study, experiments are conducted on 1D calibration structures. The results, based on the sets of five 1D calibration structures, are shown in the figures below (Figure 2 and 3). Figure 2 represents simulation results with setup for C-Quad illumination mode while Figure 3 is for the setup for Annular illumination.

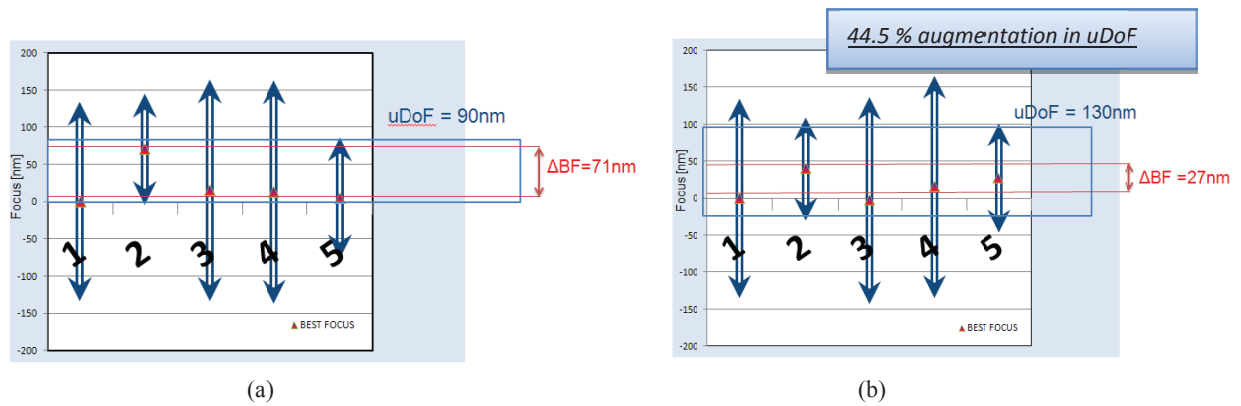


Figure 2: : C-Quad illumination mode (a) uDoF and delta Best Focus *before* wavefront optimization on 1D calibration structures (b) uDoF and delta Best Focus *after* wavefront optimization on 1D calibration structures

First the setup with C-Quad illumination on 1D calibration structures is analyzed. Figure 2 (a) shows a snapshot without wavefront correction map and (b) with the correction map. These figures indicate the best focus (red triangles) and the DoF (blue arrows) for each 1D calibration structures (see notation in Table 1). The best focus dispersion is minimized after the optimization of the wavefront. So that makes the uDoF *augmented by 44.5%*.

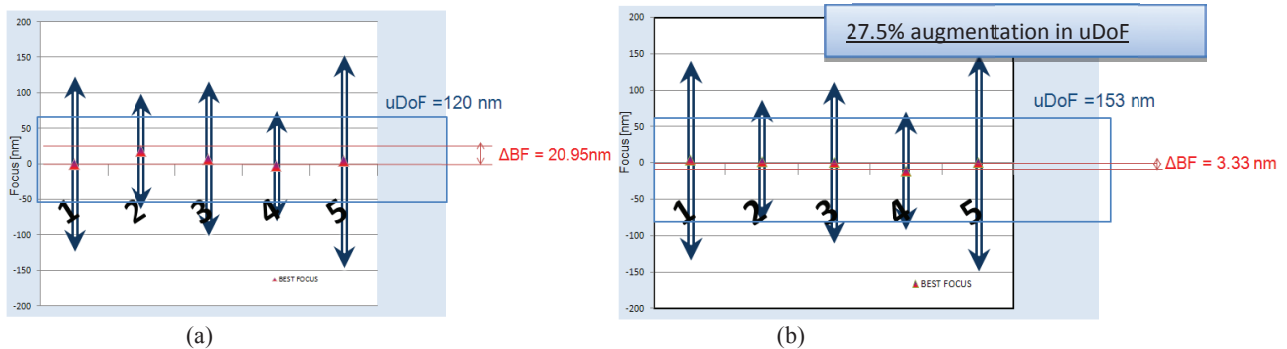


Figure 3: : Annular illumination mode (a) uDoF and delta Best Focus *before* wavefront optimization on 1D calibration structures (b) uDoF and delta Best Focus *after* wavefront optimization on 1D calibration structures

Figure 3 corresponds to setup with Annular illumination on 1D calibration structures. Figure 3 represents the analyzed simulation data in the same manner, where the left (a) image indicates the snapshot without wavefront optimisation and the right one (b) shows a snapshot by employing the correction map. Best focus and DoF of each calibration structures are represented similar to Figure 2. In this case there also is a noticeable amount of mitigation in delta best focus, though weaker than the previous case, which can be the fact that Annular illumination source was applied. A re-centering of best focus is observed, thus a 27.5% extension in uDoF due to wavefront tuning is achievable.

The summarized results from the experiments using Tachyon SMO-FW simulations are shown in Table 2 for the delta best focus and Table 3 for the uDoF. Data reported here are including in additional results from optimizations on 2D calibration features with both illumination modes.

Table 2: Delta best focus dispersion from Tachyon SMO-FW simulation on the four calibration sets

Illumination mode	Calibration structure type for correction map generation	ΔBF [nm] Before SMO FW	ΔBF [nm] After SMO FW
C-Quad	1D	71	26
	2D	12	1
Annular	1D	20.9	3.3
	2D	13.1	2.6

Table 3: The uDoF from Tachyon SMO-FW simulation on the four calibration sets

Illumination mode	Calibration structure type for correction map generation	uDOF [nm] Before SMO FW	uDOF [nm] After SMO FW	Percentage [%] of uDoF augmentation
C Quad	1D	90	130	44.5
	2D	122	134	9.9
Annular	1D	120	153	27.5
	2D	60	72	20

Table 2 shows pronounced best focus dispersions before wavefront tuning, which are reduced after the optimization. As consequence the overlapping DoF (see Table 3) of the whole set of calibration structures improves (up to 44.5%). These results drive further study in to the use of the FlexWave module to explore its effects, which are validated mainly by SEM measurements.

4.3 Method of validation by rigorous simulation

The purpose of this validation is the feasibility of focus shift decrease by wavefront tuning by rigorous computational lithography. The evaluation is performed on the calibration structures by using the capabilities of the Panoramic Technology® simulation package. The FlexWave correction maps (or more specifically the Zernike coefficients), the output data from Tachyon are used. These FlexWave correction maps consist in information of the wavefront specified with 64 Zernike coefficients which are introduced as input.

The impact of the utilization of the wavefront map is estimated assuming the same structures and illumination conditions as applied in the Tachyon SMO-FW M3D simulations. The result shows a same trend as in the previous section for the Tachyon SMO-FW simulation. They are reported below:

Table 4: Delta best focus dispersion from Panoramic® simulation on the four set of calibration structures; *NA means that that it was not possible to investigate further for the validation of wavefront correction map on 2D calibration features (C-Quad illumination mode), since there is a limitation of resolution.

Illumination mode	Calibration structure type for correction map generation	ΔBF [nm] without wavefront optimization	ΔBF [nm] with wavefront optimization
C-Quad	1D	55	35
	2D	NA*	NA*
Annular	1D	13.71	5.20
	2D	20	5

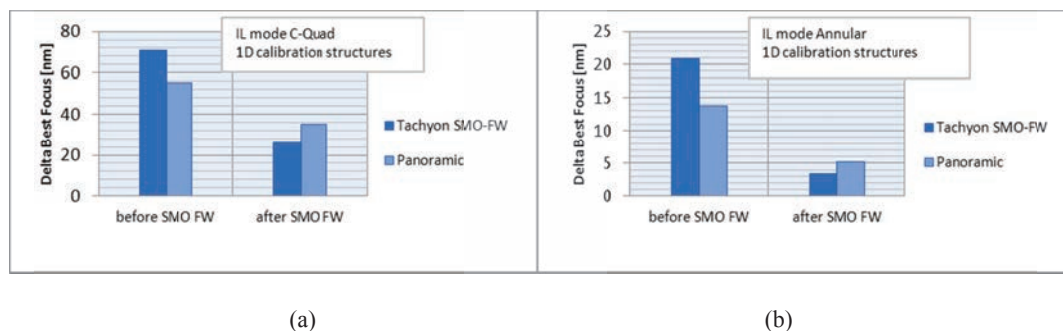


Figure 4: Delta Best Focus comparison (a) for C-Quad illumination mode (b) for Annular illumination mode; illustrating the difference before and after wavefront optimization by Tachyon SMO-FW M3D and Panoramic®; simulation results based on 1D calibration structures

Figure 4 (a) with setup for C-Quad illumination mode and (b) with setup for Annular illumination mode illustrates clearly the comparable tendency between the Tachyon SMO-FW and Panoramic® software simulations by indicating the status without and with wavefront optimization for the delta best focus.

5. VALIDATION BY EXPOSED WAFERS' MEASUREMENT ANALYSIS

Wafers are performed using FlexWave on an ASML NXT:1950i scanner through dose and focus to confirm the simulation results and to check the impact on silicon. Here we used the generated wavefront correction maps (based on the Tachyon SMO-FW M3D simulations) as input data into the scanner. Two additional wafers are processed without any correction maps serving as references. Measurements are realized by scanning electron microscopy (SEM).

In this evaluation on processed wafers, the SEM measurement data are split into:

1. Evaluation of the simulation on calibration structures
2. Evaluation on non-calibration structures

The SEM measurements analyses consisted mainly of process windows (PW) and Bossung curves analysis.

5.1 SEM measurements analysis on calibration features

As a starting point, to combine simulated and measured results, the calibration structures are analyzed by full-map SEM measurements. The table below shows the study on calibration features with the difference in best focus dispersion before and after optimization:

Table 5: SEM analysis results on proceeded wafers

Illumination mode	Calibration structure type for correction map generation	ΔBF [nm] without FW	ΔBF [nm] with FW
C-Quad	1D	28.9	10.1
	2D	16.6	3.5
Annular	1D	27.7	6.7
	2D	14.3	11.1

Table 5 clearly shows an impact in best focus shift for the calibration features: a noticeable decrease can be observed. The best focus of each calibration structure demonstrates improvements on alignment, which also have uDoF impact as follows:

1. At C-Quad Illumination mode; an augmentation of uDoF approximately from 60 nm to 110 nm (with the wavefront correction map generated on the 1D calibration features) ; from 60 nm to 90nm (with the wavefront correction map generated on the 2D calibration features)
2. At Annular Illumination mode; an extension of uDoF approximately from 80 nm to 120 nm (with the wavefront correction map generated on the 1D calibration features); from 80 nm to 110 nm (with the wavefront correction map generated on the 2D calibration features)

These results show tight correlation with Tachyon SMO-FW simulation results.

5.2 SEM measurements analysis on non-calibration features

Within this section, the goal is the inspection of the impact on additional set of features (beyond the calibration structures) that were not served to optimize the wavefront; therefore to explore the validity of the optimization. Beside the validation of the optimization the objective of this analysis is the choice of calibration structures.

This analysis includes a set of 21 features. A similar trend can be observed: the best focus of each individual structure is re-centered reducing the overall dispersion of best focus (Table 6 below).

Table 6: SEM analysis results on proceeded wafers

Illumination mode	Calibration structure type for correction map generation	ΔBF [nm] without FW	ΔBF [nm] with FW
C-Quad	1D	47.10	26
	2D	47.10	30.2
Annular	1D	41.60	12.7
	2D	41.60	31.5

Table 6 clearly shows the impact of the application of wavefront tuning using FlexWave, reducing the best focus dispersion. Along the best focus mitigation a noticeable augmentation can be observed in uDoF:

1. At C-Quad Illumination mode, an augmentation of uDoF approximately from 80 nm up to 110 nm (for both the generated wavefront maps on the 1D and 2D calibration structures)
2. At Annular Illumination mode, an extension of uDoF approximately from 60 to 110 nm (for the wavefront map generated on 1D calibration structures) and nearly from 60 to 90 nm (for the wavefront map generated on 2D calibration structures)

With the aim of investigation on calibration structures selection, the validation on additional features is completed by checking the possible penalties derived from the application of wavefront tuning. Along the SEM measurements analysis, no remarkable degradation can be observed. Furthermore the application of the correction map, generated on 1D calibration structures, shows more significant reduction in delta best focus. So means that for further improvements on calibration structure selection: the focus is on 1D features regarding measurement feasibility/complexity aspect.

5.3 SEM measurements analysis on hotspots

Finally, in order to explore the impact of wavefront tuning by FlexWave on metal 28 nm hotspots, a set of hotspots structures is chosen from production full-chip verification using Tachyon Lithographic Manufacturing Check (LMC) simulations. Tachyon LMC is a RET verification software solution that can provide the most critical spots including bridging and necking defects. Note that these LMC simulations are not the same for Annular and C-Quad illumination sources, thus different hotspots are checked for the two different illumination sources. These experiments consist of bridging and necking defects with overall about ten hotspots for each case. At the chip level measurements are performed by SEM on the whole wafer. Focus shift analysis is addressed first to assess whether applying the correction map using FlexWave re-centers best focus. In parallel the impact on uDoF improvement is investigated.

The study of these critical defects is not obvious; the extraction of the results is complex: a reliable determination of the best focus and uDoF cannot be made automatically. A commonly applied method is visual analysis – these results are handled this way. As such there might be an offset between SEM measured and simulated data due to measurement data quality (which can always be the case for all SEM measurements).

These results corroborate the computational wavefront optimization in that the overlapping process window is improved: the position of the best focuses is re-centered (Figure 5 below) for checked hotspots thus uDoF is extended:

1. At C-Quad Illumination mode, the best focus dispersion on the chosen hotspots decreased from around 30 nm to 10 nm (same as for both the applied wavefront map generated on 1D and 2D calibration structures); and an augmentation of uDoF from 60 nm up to 90 nm
2. Using Annular Illumination, best focus mitigation of 60 nm to 30 nm is achieved (using the wavefront map generated on 1D calibration structures) and to 20 nm (with the wavefront map generated on 2D calibration structures) ; and an extension of uDoF approximately from 60 to 80 nm

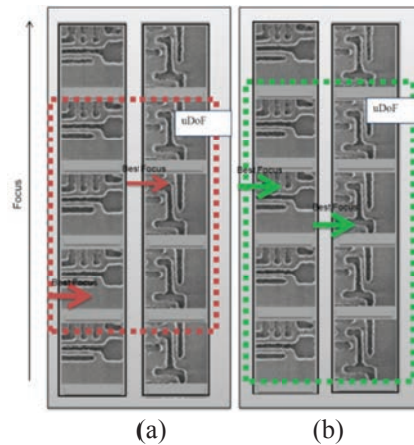


Figure 5: Illumination mode: C-Quad; Example of the wavefront optimization impact on metal 28 nm hotspots bridging at best dose illustrating the re-centered best focus position and evaluated uDoF for taken hotspots (a) without FW (b) with FW

Overall, according to these data, the hotspot evaluation showed close correlation between SEM measurements data and simulation data from Tachyon SMO-FW.

6. CONCLUSION

In this paper the compensation of mask 3D effects by correction of the wavefront based on the application of FlexWave is investigated. According to the performed wavefront optimization using computational lithography and SEM measurements analysis there is a noticeable effect from the mask topography. The wavefront manipulator tool enabled an imaging enhancement by minimizing mask topographic effects.

Based on comparative analysis on 28 nm metal layer of computational lithography and SEM measurements data, consistent results were found. By presented experiments it was shown that both by computational lithography and scanner side that an increase up to 45% in uDoF can be achieved by applying wavefront optimization.

Beyond the exploitation of uDoF enhancement, investigation was performed in order to assist calibration features selection. Here we found that 1D features are the best candidates to serve for wavefront correction map generation. However it should be noted that there is a limitation of calibration feature selection to determine focus shift sensitivity since it is still a challenge. Potential further improvements are on-going at this point.

7. ACKNOWLEDGMENT

The author would like to acknowledge the kind help and support from all the members of this project - partnership between ST Microelectronics, ASML and ASML Brion. Special thanks Maxime Gatefait (ST Microelectronics); Arjan Verhappen and Lorraine Flannery (ASML) for preparing and performing wafer exposure and Corno van Lankveld; Orion Mouraille for their support on simulation.

REFERENCES

- [1] M. Saeid et al., "Three-dimensional mask effects and source polarization impact on OPC Model accuracy and process window", Proc. SPIE 6520 (2007)
- [2] A. Erdmann et al., "Mask and Wafer Topography Effects in Immersion Lithography", Proc. SPIE 5754 (2005)
- [3] A.K. Wong et al., "Edge Effects in Phase Shifting Mask for 0.25 μ m Lithography", Proc. SPIE 1809 (1992)
- [4] L. S. Melvin et al, "Three Dimensional Mask Effects in OPC Process Model Development From First Principles Simulation", Proc. SPIE 6792 (2008)

- [5] J. T. Azpiroz et al, "Massively-Parallel FDTD Simulations to Address Mask Electromagnetic effects in Hyper-NA Immersion Lithography ", Proc. SPIE 6924 (2008)
- [6] Jo Finders et al., "Solution for 22nm node patterning using ArFi technology", Proc. SPIE 7973(2012)
- [7] F. Staals et al., "Advanced Wavefront Engineering for Improved Imaging and Overlay Applications on a 1.35 NA Immersion Scanner", Proc. SPIE 7973 (2011)
- [8] Jo Finders et al., "Mask 3D effects: impact on Imaging and Placement", BACUS Photomask news, Vol.27 (2011)

Resist model validity regarding source variation in Source Mask Optimization

C.Alleau, E. Yesilada, V. Farys

STMicroelectronics - 850 rue Jean Monnet, F 38926 Crolles Cedex, France
email: clovis.alleau@st.com

September 12, 2012

Abstract

Source Mask Optimization (SMO) is an advanced resolution enhancement technique with the goal of extending optical lithography lifetime by enabling low k1 imaging [1,2]. On that purpose, an appropriate source and mask duo can be optimized for a given design. SMO can yield freeform sources that can be realized to a good accuracy with optical systems such as the FlexRay [3].

Such optimization process is done through optical simulation to determine the source and the mask shape. Therefore, as a unique source shape is obtained, a unique optical model is generated. However, this optical model is not sufficing to predict the resist behaviour, and a resist model has to be had to the optical model. Such model is generally calibrated once for a given source and corresponding wafer measurements.

However, SMO will yield different sources for different design layout, which could be similar or totally different. With the existing flow, a new optical model is generated for each source. But resist model remains unchanged due to unavailability of corresponding wafer data.

In this paper, we will study the validity of the resist model calibrated for a given source with respect to other sources. Both freeform and parametric sources will be presented and compared. The main goal of such study is to confirm if different sources can be used with the same resist model.

Keyword: Source Mask Optimization, Source error, Zernike, Process Window

Introduction

Optical lithography is a very complicated stage in the semiconductor fabrication process, which takes a lot of time and costs money. Therefore, in order to avoid having to actually print and measure a wafer every time something needs to be looked at, simulators have been developed. They can predict with an adequate accuracy the final results of the wafer printing.

Source Mask Optimization is a Reticule Enhancement Technique used for advanced lithographic node. The principle of this technique is based on the fact that using an off-axis illumination increases the resolution limit and allows

the lithographer to print smaller feature. Each feature has specific critical dimension, so we use more or less complicated source in order to maximize the process window for every feature.

The model is separate into two different parts, the first one, called the optical model, contains all the information from the optical part of the simulation. It contains data from the scanner, like numerical aperture, wavelength, lens aberration and, most importantly, the source shape. It could be perfectly accurate while using for instance a finite difference time domain method, or approximated. Usually, in order to gain some precious time, an approximated method is used in lithography simulator. This part, as it only contains fixed and known arguments, can be pre-calculated easily using the transmission cross coefficient, called TCC. It is not linked to the experimental data and is only theoretical. However, as it is linked to the optical source shape, it has to be recalculated for every new source, and therefore after a Source Optimization step. This model is used to calculate the aerial image, and is also known as the constant threshold model.

The second part of the model is called the resist model. This part can also either be based on physical properties, like resist diffusion regarding the chemical composition of the resist [4] etc... However, those models take too much time to compute, and therefore are usually replaced by empirical mathematical models. The idea is to create a mathematical model which reduces the error between the constant threshold model and the wafer measurement. It is completely empirical and is usually not linked to any physical properties [5]. It only consists of convoluting the aerial image with a more or less complex mathematical formula (usually several Gaussian functions), and is therefore not linked to any optical variable. The formula is calibrated by comparing the aerial image and a set of measurement data done with the same optical properties than the one describing the optical part of the model. It is usually done once and for all for a unique technology, mask, set of mask or resist. Therefore, it does not include any information about the source shape. If the source changes because of a Source Optimization, scanner issue or any other reason, this model will remain the same.

In this study, we wanted to see if changing the source impacts not only the optical model but also the resist part of the model. We will try to see if this resist model needs to be recalibrated once the source changes, or if the optical model modification can predict the wafer impact of this change. Finally, we will study this need of recalibration regarding the source variation, implying a new way of measuring this source variation.

1 Methodology

In order to show if the resist model has to be recalibrated after changing the source, we define a simple methodology. In the section we are going to present it step by step. First of all, we define an initial source arbitrarily. For this study, the source is not linked to any technology, production flow etc. It's just an initial stage and helps us to illustrate the methodology. From this source, we developed an optical model and printed test structures. Then, from these test structures, we calibrate a resist model. This resist model allows the measure to fit the simulator prediction as good as possible, whatever it looks like. It is

important to understand that the results we obtain on the wafer don't need to be good in term of process window, depth of focus or what so ever. However the model needs to fit perfectly the wafer measurements.

The initial source we used in this study is a cquad with the setting $\sigma_{in} = 0.8$ and $\sigma_{out} = 0.95$, and an opening angle of 30° .

Once the model is calibrated, we tried to change the source. We selected a set of measure, both 1D and 2D, which are going to be our references set of data. In this paper we are going to study only 10 structures which is enough to understand the methodology used, but more can easily be studied if needed, at either best condition and defocus or non nominal dose.

For each one of those structure, we measure the difference between the model prediction and the actual measure. This gives us a range of variation for the nominal case. This variation represents the maximal variation we could expect to see between prediction and reality.

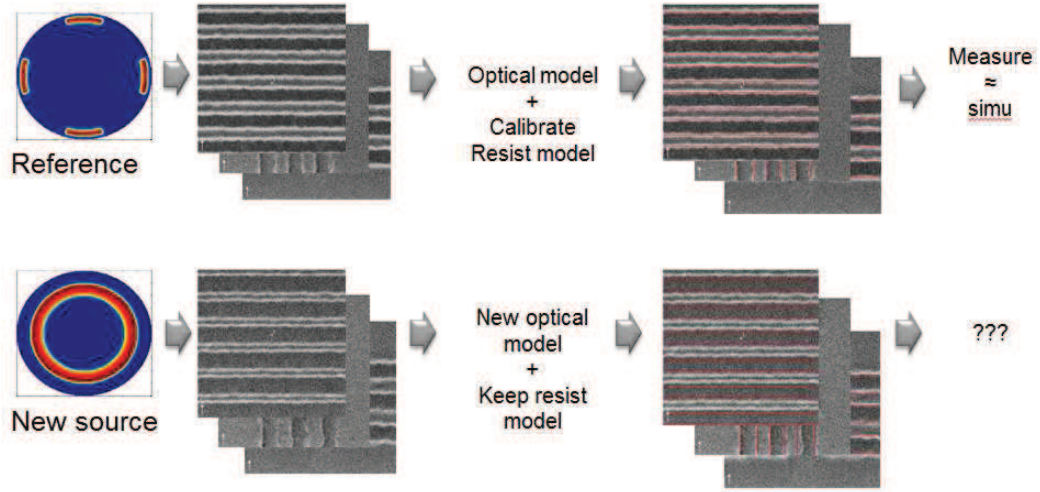


Figure 1: Methodology illustration: Source change impact model predictability. Does changing only the optical model good enough to predict the new results? Do we also need to recalibrate the resist model?

Once the model is calibrated for the cquad source and the variation range measured, we could perturb the experiment by changing the source. Indeed, once we change the source, the optical part of the model is recalibrated with the new source, while the resist model remains the same. Every other parameter, like the mask OPC, the resist used, the scanner etc... remains exactly the same.

With this new optical model and the old resist model, we simulate the results. On the other hand, a wafer is exposed with the new source and we measure the same structures as we did before. As we compare those two set of data, we could see if the source's change could be predicted by recalculate only the optical part of the model. If so, the simulation should be quite the same as the measure, or at least have the same variability. In our case, that would have meant that the

maximal difference between the simulation and the wafer is about 2nm. Once again it is important to understand that the quality of the results doesn't really matter here, as long as they are well predicted by the model. The methodology is resumed in the figure 1.

For this part of the experiment, we used a totally different source, which is an annular source with $\sigma_{in} = 0.65$ and $\sigma_{out} = 0.8$. The differences between the simulation and the measure for both the cquad and the annular sources are shown in the figure 2.

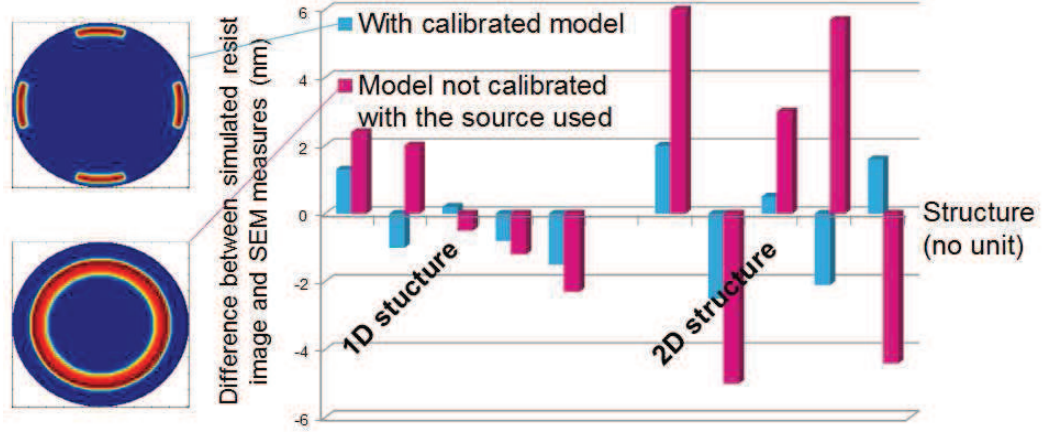


Figure 2: Difference between simulation and measure, for two really difference sources, while using the same resist model. We can see that the results are not predictable, and the variation range way bigger for the source with which we didn't calibrate the resist model.

As we can see on this figure, for two completely different sources, the results are absolutely not predictable and the variation range is way bigger than initially. If we change the source that much, we have to recalibrate the resist model with the new source.

We then did the exact same experiment with a source which is more similar with the first source, and which is shown in figure 3. The source is composed with the same cquad as the initial one, but we add a quasar contribution with an intensity of one, a $\sigma_{in} = 0.7$ and $\sigma_{out} = 0.75$, and an opening angle of 5° . Just enough to add four small light dot on the initial source.

The results we obtain by measuring the difference between wafer measurement and simulation done using the initial resist model with a updated optical model are shown in figure 3.

As we can see here, the results are this time perfectly comparable and the variation range is quite the same as previously. In this case, the resist model can therefore still be used to predict the wafer results.

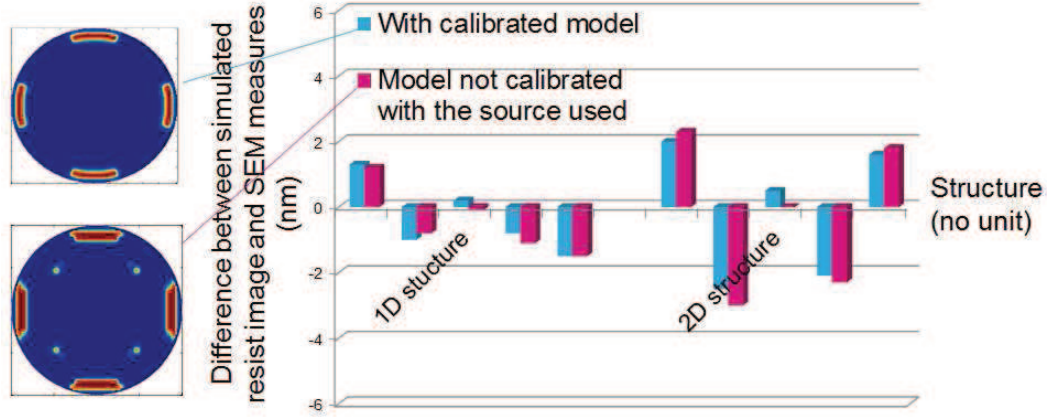


Figure 3: Difference between simulation and measure, for two similar sources, while using the same resist model. We can see that the results are predictable and we don't need to recalibrate the resist model.

2 Source distance notion

It appears that the first cquad is similar to the last source, but is not similar to the annular source. This notion of similar is quite obvious for the naked eye, but we need a way to measure it mathematically speaking.

In a previous study we have proposed an easy way to measure the difference between two sources. In order to be familiar with it we are going to take a look at this method.

The method consist at decomposed the source into a polynomial sequel. Indeed, it is possible to decompose any function to an infinite sequel of polynomial as long as the polynomial used are define on the same domain that the function and that the polynomial are orthogonal. As the source is a function define on the unit disc we need a set of polynomial which are orthogonal and define on this disc. As a matter of fact, the Zernike polynomial [6] respond to those two criteria perfectly. Therefore, it is possible to decompose any source with an infinite weighted sum of Zernike polynomial. We also prove in the previous paper that the higher the polynomial coefficient is, the smaller the coefficient become, and therefore, only the few first polynomials are needed.

So, we can decompose any lithographic source into a finite weighted sum of Zernike polynomial, as shown in the figure 4.

As the Zernike polynomials are orthogonal, they create a vector space; we can says that the sequel which define the weighted sum is the position of the source in such vector space.

Two different sources would therefore have two different positions inside this vector space. So, we can measure the Euclidian distance between this two points, point which represent two different sources. So, we can measure the difference between two sources by measuring this distance. The methodology is

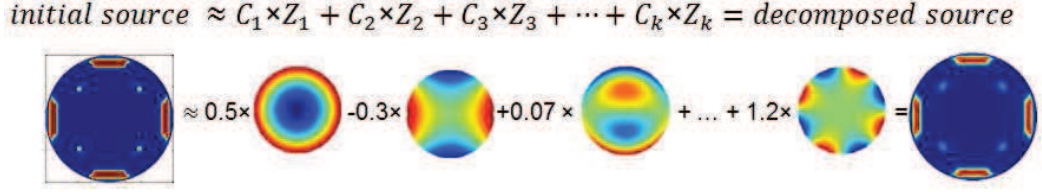


Figure 4: Illustration of the Zernike decomposition principle. A source shape can be decomposed into a weighted sum of Zernike polynomial.

represented in the figure 5

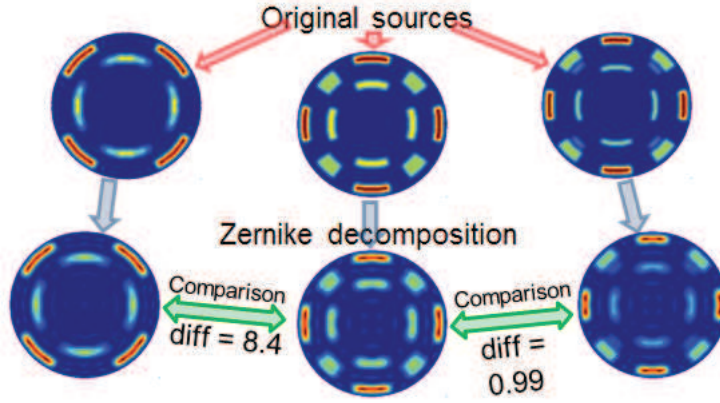


Figure 5: Illustration of the Zernike decomposition and comparison principle. It is possible with this method to say which source is closer from the original and which one is more different.

With such method, we have successfully developed a new simple way to quantify the difference between two sources. The previous notion of source alike is no longer an abstract notion and can now be measure.

3 Model variability versus source distance

Now that we are able to quantify how different our previous sources were, we can try to link this difference with the previous variation range that we obtain previously. However it seems complicated to find a corollary between source distance and range variation with only three wafers measured and three variation range obtain.

In order to have more data, we decide to double the number or experience, allowing us to obtain the following results for both 1D (figure 6) and 2D (figure

7).

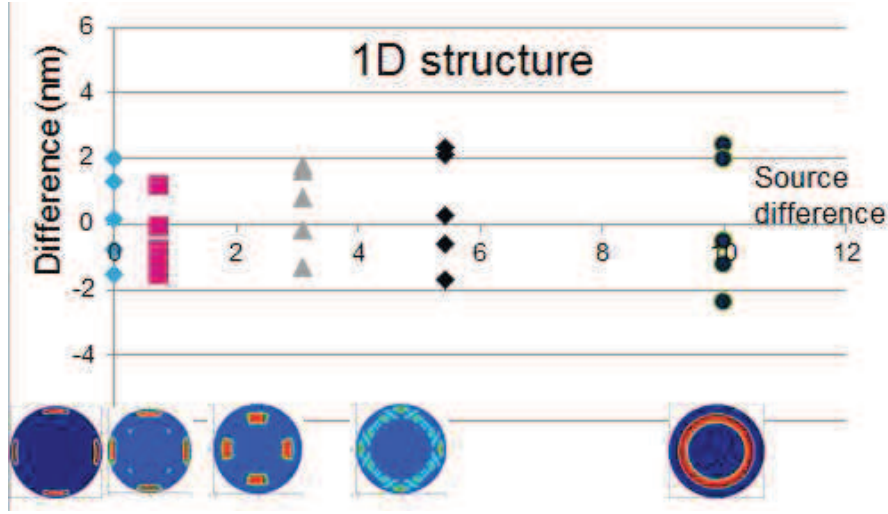


Figure 6: Evolution of the maximal difference between the simulations and the actual measure for 1D structure, regarding of the source used and the difference from the initial source used to calibrate the resist model.

It is also possible to draw the divergence evolution regarding of the source difference, in graph 8. In this graph we can clearly see a link between the distance from the source, aka the difference from the original source, and the model divergence.

4 Interpretation

The results of this study is clearly visible in the graph 8. As we can see, the more different the source is the bigger is the divergence of the model. It became obvious that when the source is too different from the initial source with which we defined the initial model, it is needed to recalibrate the resist part of the model.

In this study we haven't define specification for the maximal divergence of the model, but it seems to be quite easy to establish such specification. They could be used in several cases. For example, during the Source Mask Optimization flow, we can limit the source variation from the initial source in order to obtain a final source for which we are positively sure that the resist model we use in our production flow fits quite well with the wafer measurement. It could also be used to put a warning when comparing source via simulation with the same resist model. A lot of possibility can be found, we only need to calibrate for a single model the variability regarding several sources and ask ourselves what maximal model divergence can we tolerate.

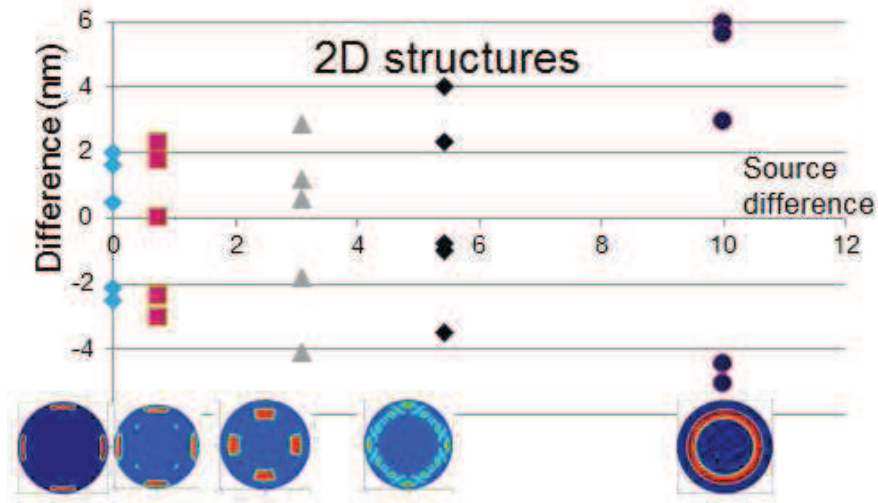


Figure 7: Evolution of the maximal difference between the simulations and the actual measure for 2D structure, regarding of the source used and the difference from the initial source used to calibrate the resist model.

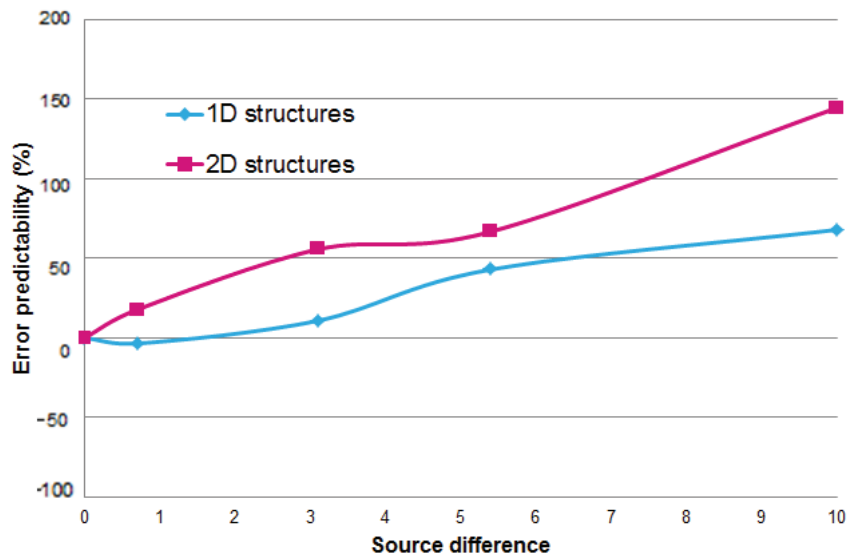


Figure 8: Evolution of the range, in % regarding of the source difference from the initial one.

5 Conclusion

In this paper we have successfully introduce a new method to compare sources and measure the distance between two sources. We also have proved that modifying the source strongly has a non-negligible impact on the empirical part of the model, called resist model. It also appears that 2D structures are more impacted than 1D structure.

We also have successfully linked the model instability to the difference between the source used for the original model and a different source. With this method we can now easily define a limitation for source variation through Source Mask Optimization process, which was never done before.

- [1]. Alan E. Rosenbluth, et al. "Optimum mask and source patterns to print a given shape", SPIE Vol. 4346, pp 486-502 (2001)
- [2]. Alan E. Rosenbluth et al. "Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography", SPIE Vol. 7274, (2009)
- [3]. M. Mulder et al. "Performance of FlexRay, a fully programmable Illumination system for generation of Freeform Sources on high NA immersion systems", Proc of SPIE vol. 7640 (2010)
- [4] L. Capodiec, Optimization Techniques for VLSI Modeling and TCAD in Semiconductor Manufacturing, PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, (1996).
- [5] N. Cobb et al., Experimental results on Optical Proximity Correction with Variable Threshold Resist Model, Proc. of SPIE, Vol 3051, p208, (1997).
- [6]C. Alleaume, et al., "Quantification of the difference between two sources by Zernike polynomial decomposition", Proceedings of SPIE Vol. 7973, 79731Y (2011) SPIE Digital Library

SMO and retargeting: Source mask target optimization flow

C.Alleau, E. Yesilada, V. Farys

STMicroelectronics - 850 rue Jean Monnet, F 38926 Crolles Cedex, France
email: clovis.alleau@st.com

September 13, 2012

Abstract

It's been several technological nodes now that lithographers use the same 193nm wavelength in order to realize smaller and smaller features. In order to extend the lifetime of 193nm lithography, innovated techniques have been implemented. Source Mask Optimization is one of them, and consists in using a dedicated optical source associate with a specific layout in order to print aggressive features with a better patterning fidelity.

Retargeting is widely use during optical proximity correction to enlarge process window. Such retargeting is usually done through geometrical rules, and is called rule based retargeting. Retargeting has a strong impact on the Source Mask Optimization technique, both on the source shape and the OPC result.

Traditional SMO flow uses a fixed lithography target. However, modifying this target during SMO flow adds another degree of optimization and can result in a different source that can provide better process window than traditional method. We developed therefore a model base retargeting within SMO flow in order to optimize the target iteratively along with the source.

In this paper, this new flow will be presented showing the impact of model based retargeting on SMO. Process window simulation along with 1D and 2D structures will be studied.

Keyword: Source Mask Optimization, Retargeting, SMO, model based, process window

Introduction

The retargeting is an important RET step which allow us to easily print critical features by modifying their shape. This technic changes the lithographic target, and makes it slightly different. Such technics usually is used to increase the process window, by reducing the criticality of some feature. [1,2]

Source Mask Optimization is a Reticule Enhancement Technique used for advanced lithographic node. The principle of this technique is based on the fact that using an off-axis illumination increases the resolution limit and allows the lithographer to print smaller feature. Each feature has specifics critical

dimension, so we use more or less complicated source in order to maximize the process window of every feature. [3,4,5]

These two technics, if they are as of today well known and mastered, have until now never been combine and use together. This study will try to show the impact of one technique to another. Then we will introduce the new flow Source Mask Optimization that allows us to optimize within the same process the target and the source simultaneously.

1 Retargeting impacts SMO

In this section we are going to show that retargeting and source optimization are linked and codependent. It appears that changing one of them will impact the second.

The fact that the retargeting impacts the Source Optimization is not a big surprise. Indeed, on a theoretical approach, it is easy to say that the modification of the target can change some geometrical values within the design. Some CD values, spaces values and/or 2D critical distance values will change. As the source mask optimization output depend strongly of these critical dimensions, it seems obvious that this output will be impacted by the modification of those critical dimensions.

In order to corroborate those saying, we tested several pattern before and after retargeting, and use them with a standard SMO flow. For almost every structure, and regardless of the origin of the SMO source, we obtain the following results: as expect, the source shape was modify by the retargeting. We can look at an example on figure 1. Therefore, we can say that the Source Mask Optimization is changed by the retargeting technics.

Also, like for retargeting within OPC, the retargeting has a strong impact on the process window. Here, we can see that not only the SMO results is different, also the process window is different. This could be obvious, because the measurement metric changes (CD size, critical 2D features etc...), but this is still a serious improvement. In fact, different retargeting will gives us different SMO results and different process window values.

If the target has an impact on the source and on the process window, then we can say that an optimized target exist; it's the target which, linked to the appropriate source gives us the best process window.

2 Model Based Retargeting

If different target gives us different process window, this means that the target could be optimized. There is potentially an optimum target for which one the process window is the bigger. The problem we have here is that most retargeting which are done within a RET flow are ruled based [1]. That means that the target modification follows a simple geometrical rule which moves the different edges segments regarding of their close neighbors. However, it seems unlikely that this method could bring the optimum target. Moreover, once the technic is applied once, the rules don't change and the target is fixed, and can't move again without defining new rules.

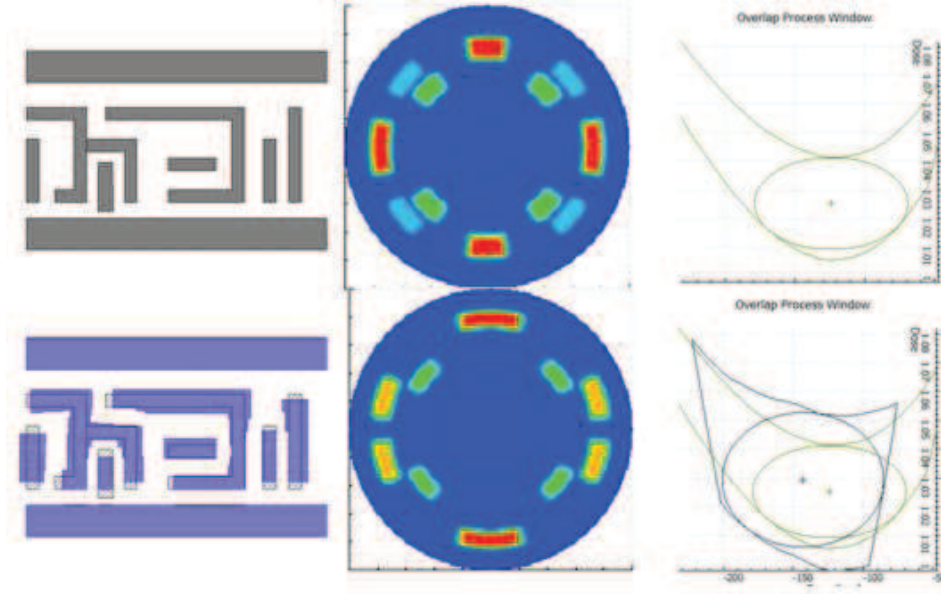


Figure 1: Illustration of the retargeting impact on Source Mask Optimization. Different target for a same electrical design gives different Optimized source and different Process Window. As we can see, the initial target, which is the electric design (in gray) gives us a initial source and a initial process window (on the top line). However, after a rule based retargeting in blue (the old design is still visible for comparision) gives us a new source on the bottom line, and a bigger process window in blue (the old process window is still visible in green for comparison).

So, in order to find the optimum target, we have to use a different approach, an optimization approach. Therefore, we create a model based retargeting. Indeed, a model based retargeting could easily be used in an iterative process, which hopefully could tend through an optimum target.

As we wanted this new retargeting simple and fast, we developed the following model based retargeting, using simple rules:

- In order to increase the depth of focus, we need the resist image to remains identical when the focus changes. A simple way to have this property is when the resist image is located on an isofocal point (the point where image intensity is the same whatever the defocus is). An example can be seen on the figure .
- If for every edge the resist image is on an isofocal point, the whole process will be really strong against defocus.
- In order to have the edge on the isofocal point, we can simply move the target's edge on a close isofocal point.

- However, once we have done that, the OPC has to rerun, and the image intensity will be modified by this new OPC. Therefore, with the new OPC, we have to change once again the target, by moving it to the nearest isofocal point.
- With this simple flow, we have created an iterative retargeting flow that allows us to increase the process resistance through defocus. However, not every structure has an isofocal point close to them. Therefore, we have to find a way to optimize the process also for those structures without isofocal point.
- The same way we did with isofocal, we can concentrate on the dose variation. In fact, the steeper the slope is, the less the final image is sensitive to dose variation. Therefore, in order to increase the process window, we can move the target to a close point where the slope is maximal. By doing that, we helped the process be stronger through dose variation. This step is represented on the figure 3
- This method is used instead of finding the nearest isofocal point and, same as previously, we still need to rerun the OPC and use an incremental method.

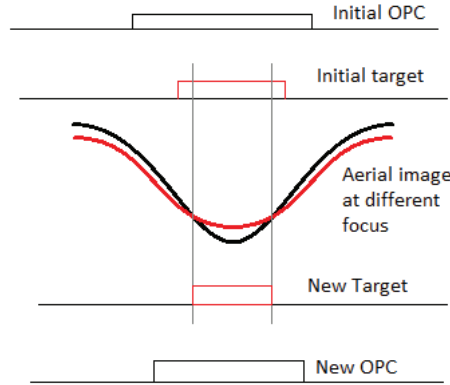


Figure 2: Illustration of the principle of isofocal point. In that case, and assuming that the resist threshold is the exact value of the intensity on the isofocal point, if the focus change, the intensity change from the blue line to the red line. The threshold remaining the same, it is still on the isofocal point, and the resist image remains exactly the same. This process is therefore really strong against defocus, and has a huge depth of focus.

While doing this, the final retargeting is therefore directly linked through the optical model, and therefore through the source shape. Different optimized

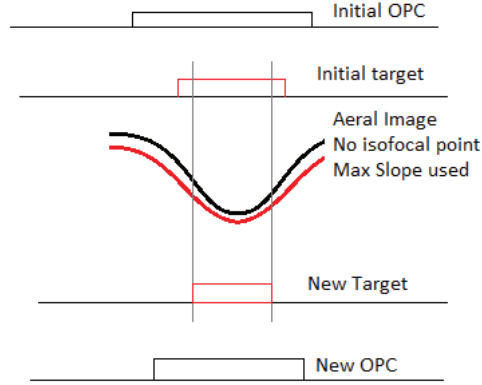


Figure 3: illustration of the new target finding with isofocal point and maximal slop point

source will give us different optical model and therefore different final retargeting. We can say that when using this particular retargeting flow the target is impacted by the source.

3 The Source Mask Target Optimization Flow

As we have shown, the optimized source is linked through the target.

Also, when using the new model based retargeting flow, the target is linked to the source.

Therefore, we can define a iterative flow, in which both the target and the source are optimized. In fact, every time one is optimized, we can re-optimize the second, and every time the second is re-optimized we can re-optimize the first, and so on.

It is also important to run an OPC before using the retargeting step in order to have a good aerial image. So, we can describe the new flow like shown in figure 4.

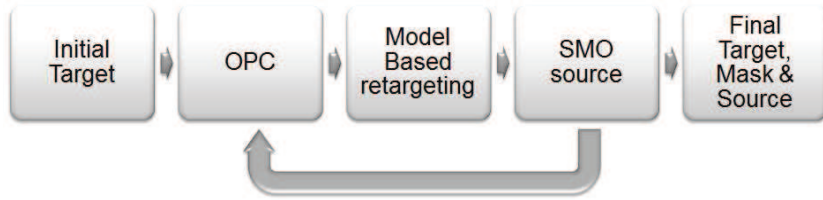


Figure 4: Illustration of the Source Marsk Optimization flow.

Where the initial target is either the electric design, or a modify target. We

can for instance run a first rule base retargeting before running the flow.

The OPC step is needed in order to have an aerial image which gives contour image which are close to the target. Otherwise the aerial image will strongly diverge near the target and we will not be able to find an isofocal point easily.

The model based retargeting is describe in the previous section, and is supposed to be fast. We use the last optimize source.

Finally, the source is optimized. The flow is independent of the optimization technics or vendor, and the OPC can be run during the Source Optimization (SO) process.

Hopefully, after several iterations, the flow will converge for both the target and the source. And hopefully again, these final results are the ones that give the bigger process window.

4 Results

As this technics is empirical, no mathematical proof cannot be found that this flow will increase the process window. However, it is possible to study the process window evolution through iteration. Several test cases were studied, with similar results.

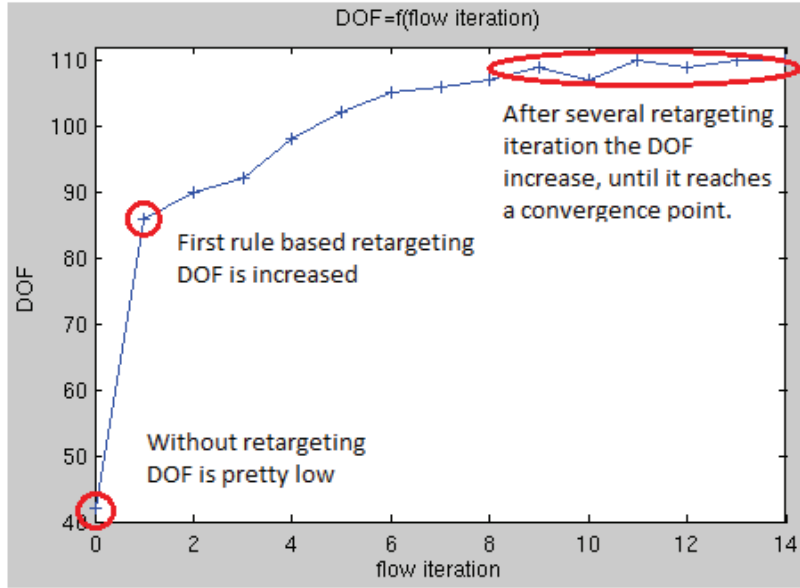


Figure 5: Evolution of the Depth of Focus regarding the SMTO iteration. We can clearly see the convergence.

The evolution of the process window is shown in the figure 5 for a 1D not repeatable structure. As we can see, the first initial step without any retargeting is not litho-friendly, as the Depth of Focus is only 42nm. The first rule based retargeting allows us to double the Depth of Focus, and gives us a reference

point. After the first rule based retargeting, several iteration of model based retargeting plus source optimization plus OPC are done, during which the DOF is also measured. As we can see, the DOF clearly increase through the ten firsts iterations and goes from 85nm to 110nm. After about dozen of iteration, and a improvement of about 30%, we can see that the DOF seems to stop increasing, and both the target and the source stay unchanged after the iteration.

We can say that for this testcase it takes a dozen of iteration to converge to a maximal process window. This is a time consuming operation as every iteration implies a Source Mask Optimization step, which is known to be slow for large design. Therefore, this flow is still a quite long flow, and one of the main issues today is the runtime. In fact, not every testcase converge after a dozen iteration and we need to introduce a criteria in order to know when the flow is finished. The number of iteration is strongly dependant of the structure type and geometry, and of the initial condition and the initial retargeting.

Once the flow well defines, we ran several test cases to study the gain we could archive with this method. Two examples are shown here in the figure 6 and 7 for both 1D and 2D structures.

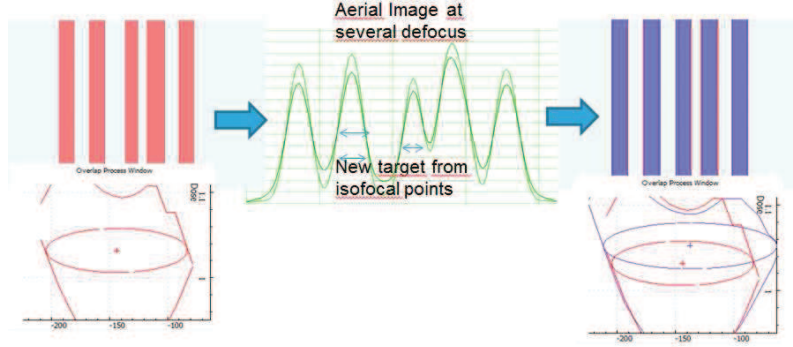


Figure 6: Results of the SMTO flow on 1D structure. As we can see the DOF is strongly improved.

The 1D structure is a not repeatable pattern, with random CD and space. As we can see, the aerial image gives clear isofocal point after the OPC, allowing a good retargeting, and increasing strongly the depth of focus.

As we can see for the 2D structure also, both the new target and the source are strongly different after the SMTO flow. The result of this new target and this new source is a process window way bigger than with just a rule based retargeting.

5 conclusion

We can therefore say that this new flow SMTO does increase strongly the process window for certain structures. The target is strongly modified while keeping the same electrical properties and the source is optimized during this iterative process.

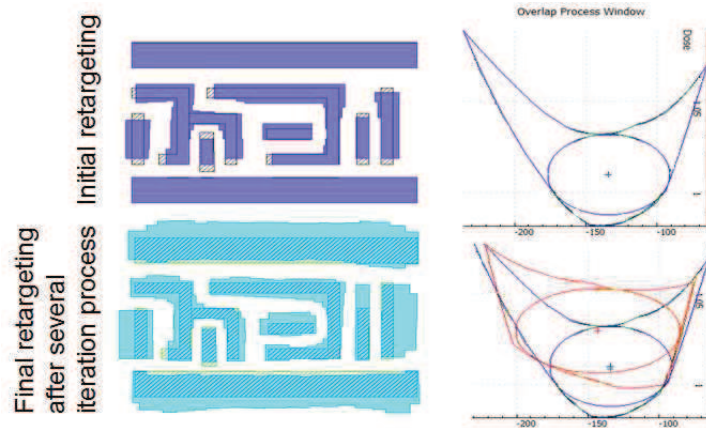


Figure 7: Results of the SMTO flow on 2D structure. As we can see the Process Window is strongly improved

This new SMTO flow was created using the new model based retargeting we developed, which is dependent of the source. Also, we have proven that the source is dependent of the target, allowing an iterative process, used to improve the process window.

One issue remains however concerning the runtime. Indeed, the source optimization is known as a time consuming technic, and this flow use a dozen of source optimization step, which leads to a really time consuming flow. Therefore, the runtime is currently one of the major concerns of such method. A large scale SMTO flow is currently under study.

- [1] David D. Palmer. 1997. A trainable rule-based algorithm for word segmentation Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA, 321-328
- [2] Ellyn Yang et al ; Model-based retarget for 45nm node and beyond. Proc. SPIE 7274, Optical Microlithography XXII, 727428 (March 16, 2009);
- [3] Yunfei Deng et al ; Considerations in source-mask optimization for logic applications. Proc. SPIE 7640, Optical Microlithography XXIII, 76401J (March 11, 2010)
- [4] Alan E. Rosenbluth, et al. "Optimum mask and source patterns to print a given shape", SPIE Vol. 4346, pp 486-502 (2001)
- [5] Alan E. Rosenbluth et al. "Intensive optimization of masks and sources for 22nm lithography", SPIE Vol. 7274, (2009)